

リーンオートメーション概念に
基づくマテリアルハンドリング
システム設計法

Methodology for the Design of
Material Handling Systems
Based on Lean Automation Concept

2019年2月

山崎 康彦

Yasuhiko YAMAZAKI

リーンオートメーション概念に
基づくマテリアルハンドリング
システム設計法

Methodology for the Design of
Material Handling Systems
Based on Lean Automation Concept

2019年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
経営デザイン専攻 生産システム工学研究

山崎 康彦

Yasuhiko YAMAZAKI

目次

1. 研究の背景と目的	1
1.1 グローバル生産における自動化ニーズの高まり	1
1.2 自動化投資リスク低減のアプローチ	3
1.3 研究の目的	7
2. リーンオートメーションの概念設計	8
2.1 リーン生産におけるムダ	8
2.2 手作業ラインのリーン化の考え方	9
2.3 オートメーション・ラインのリーン化	11
2.3.1 手作業ラインとオートメーション・ラインのリーン化の違い	11
2.3.2 オートメーション・ラインでの動作と待機時間の排除	12
2.4 マテハンシステムの稼働率向上の重要性	14
2.4.1 マテハン装置のコスト割合	14
2.4.2 マテハン装置の稼働率	18
2.5 リーンオートメーションの概念	22
2.6 リーンオートメーションに関する従来研究	25
2.7 リーンオートメーションシステム構築の課題	26
2.8 リーンオートメーションシステムの設計方針	33
3. 対象物の移動に着目したマテハン機能とマテハン装置の関係表現	37
3.1 マテハン機能の属性分類による機能属性表作成	37
3.2 マテハン機能属性に基づき必要装置が選択可能なライブラリ作成	45
4. リーンオートメーションを実現するマテハンシステム設計法の開発	49
4.1 リーンオートメーション設計法の全体像と設計手順	49
4.2 遺伝的アルゴリズムを用いたマテハン機能のグルーピングと装置の割り当て方法	50
4.3 初期解生成とサイクルタイム見積もりのアルゴリズム詳細設計	55
4.3.1 初期解生成のアルゴリズム	55
4.3.2 マテハン機能グループ案評価に必要なサイクルタイムを計算するためのアルゴリズム	57
4.3.3 タブーサーチによる機能順序の最適化	64

5. 新設計法の検証・評価.....	67
5.1 対象製品と工程概要.....	67
5.2 遺伝的アルゴリズムを用いた製品 1 台当たりの設備費最小化.....	69
5.2.1 前提条件.....	69
5.2.2 計算結果.....	70
5.3 結果の考察.....	72
5.3.1 アルゴリズムの妥当性.....	73
5.3.2 機能・空間的配置・コスト等, 複数要因を考慮したシステム設計法としての 妥当性.....	76
5.3.3 設計手法の適用範囲の広さ.....	78
6. 結 論.....	83
謝 辞.....	85
参考文献.....	88

1. 研究の背景と目的

1.1 グローバル生産における自動化ニーズの高まり

資源を持たない日本は、産業立国として絶え間ない進化を遂げていかねばならない。戦後復興から、高度経済成長、そしてオイルショックやリーマンショックなどを乗り越え、その後も脈々と進化しているものづくりは、近年の情報化技術の進展や、新興市場の成長、環境問題やグローバル規模での競争など、各種変化の中で大きな転換期を迎えていると言える。隆盛を極めた半導体や電機産業の苦戦は言われて久しいが、それに加えて、近年では日本の経済を支えている重要産業の1つである自動車産業においても大きな変革の時期に来ている。

これまでの日本製造業の成長を振り返れば、成長産業領域において連続的なイノベーションを起こしながら、かつ細部の徹底的なすりあわせによるコストと品質の競争力を背景に、国内市場を成長させながら規模を拡大するとともに、国内市場飽和後は輸出によってさらに成長拡大してきた。輸出の拡大によって貿易不均衡問題が生じた後は、継続的なコスト競争力の維持も考慮の上、主には低労務費国を中心に海外生産を加速させ、製品のみならず「ものづくり」そのものを世界中に輸出し、現地で生まれるキャッシュを日本に還元させることにより継続して日本の経済を支えている。そうした低労務費国を中心とした海外生産を活用した成長モデルにおける従来のやり方においては、日本で生み出したコア技術をベースにしながらも、手作業を中心としたものづくりによりコスト競争力を確保してきており、こうしたやり方は日本の主要産業の共通的な方策であった。しかし近年では、低労務費を活用した手作業によるものづくりの前提となる環境が大きく変化しつつある。

ASEAN 諸国を中心とした低労務費国と呼ばれていた地域も、経済成長にともなう市場規模の拡大により、大量生産時代に突入し、要求品質レベルが上がってきていると共に、労務費が高騰する中で高い生産性を求められており、手作業では競争力が維持できなくなりつつある。

低労務費を活用した手作業による生産はコストを抑えられると共に、フレキシブル性を確保しやすいというメリットがある反面、手作業ゆえの問題が多く存在する。まず、作業の習熟に時間がかかる。品質・生産性の維持と向上を成し遂げるための標準作業をベースとした作業訓練には、それ相当の訓練時間を要す。図1は Mercer Total Remuneration Survey の ASEAN 各国の離職率のデータ¹⁾であるが、図を見て分かるように、日本と比較してどの国も離職率が高く、これらの転職率の高い地域などにおいては、常に作業訓練を続けなければいけないという状況になり、品質確保の面では大きな問題となる。

次に挙げられる大きな問題として、手作業ゆえのバラツキに起因する品質問題

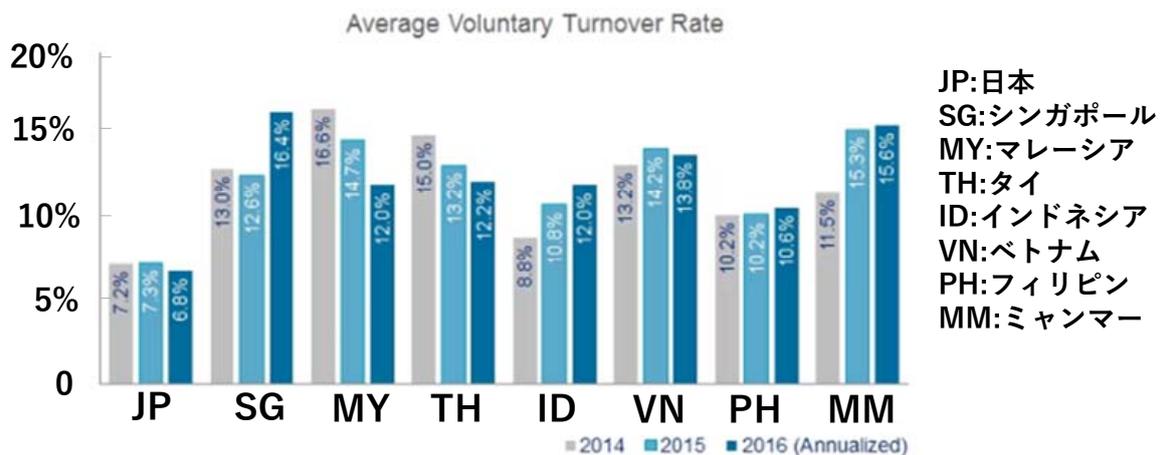


図1 ASEAN各国の離職率

の発生や生産性未達による収益悪化などのリスクがある。ヒューマンエラーは、認知段階エラー、判断段階エラー、行動段階エラーに分けられ、いずれもしくみや訓練などによって低減をする活動は常時行われているが、人である以上バラツキを0に抑えることは不可能である一方で、市場成長にともない要求品質レベルが上がっている中で、手作業工程には常に品質リスクがつきまとう。また、熟練を要するカンコツ作業や保全作業など高度な技能が求められる仕事が多く存在するが、市場に高度技能者数が少ない中での人材確保や雇用継続および育成の難しさなどが挙げられる。

そして、近年クローズアップされている最も大きな課題は、どの新興国においても、経済成長にともなって急激な労務費上昇が起きている事である。JETROのデータをベースにしたMARKLINES社の分析によれば¹⁾、タイ、インドネシア、ベトナム、中国等、主要新興国の労務費はこの6年間で160～500%もの上昇をしており、以前ほど労務費の安さを活用できる状況ではなく、低労務費国という言葉が適用できない状況になりつつある。例えば中国上海地区では今や日本の1/2程度まで上昇し、日系企業の進出が多いタイにおいても1/3程度まで上昇している。年率の賃金上昇率が10～20%の状況が続いており、今や手作業による低労務費のメリットを出せる状況にはない。

このように、市場が拡大し生産数量が増加する中で、圧倒的生産性向上が求められるという環境下において、手作業ゆえのオペレーションの難しさと労務費上昇の難しさより、これまでは手作業が当たり前であった多くの地域において自動化が求められている。新興国での経済成長やそれともなう労務費上昇、あるいは手作業が持つ多くの課題を解決する自動化ニーズの高まりは、日本の製造メーカーのみならず、世界共通課題である。

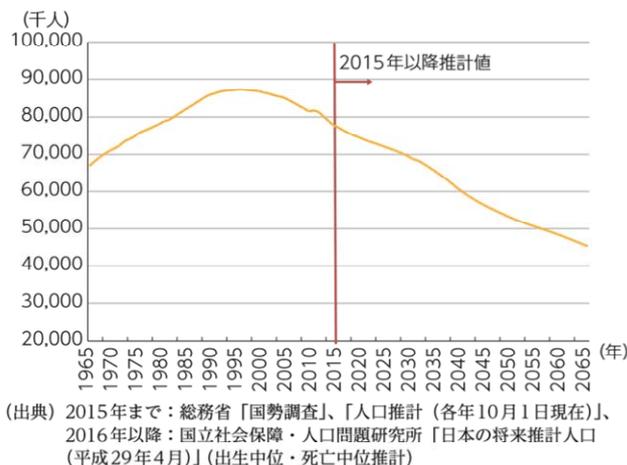


図2 日本の生産人口推移

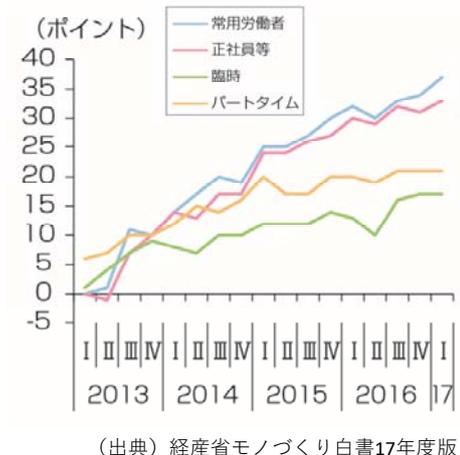


図3 製造業の労働力過不足

一方、成熟市場である先進国に目を向けてみれば、高齢化や都市への一極集中、少子化による人口減などにより、労働力確保が難しくなっている。特に日本においては、少子高齢化による人口の長期的な減少と、それによる労働力不足問題は深刻である¹³⁾。日本の人口は2008年をピークとして減少に転じているが、生産年齢人口は、図2に示すようにすでにその13年前の1995年にピークを迎え、その後急激に減少に転じている。それともなう結果として、図3に示すように、正社員に限らず非正規雇用者含めて、労働力不足は深刻な問題となっている。図は厚生労働省が行う労働経済動向調査データを経産省がまとめたものである。縦軸は調査企業において、「過不足」＝「不足」－「過剰」をポイントで表しており、年度四半期ごとのデータがグラフ化されている。ここ数年は年を追うごとに不足が増加しており、近年では大きな社会的問題となっている。

これらの状況を背景に、ボーダーレスに広がった人の行き来により、様々な人種が混在する中で、契約社員や期間社員など人材の流動性が高まってきており、長期的な雇用契約を前提とした人の確保と育成が難しくなっている。こうした状況は長期的に見ればさらに進むと考えられ、成熟した先進国においても新興国と同様に自動化による安定した製造のニーズがこれまで以上に高まっている。

1.2 自動化投資リスク低減のアプローチ

グローバルで自動化ニーズが高まる中、産業界は情報化技術の爆発的進化や環境問題を背景にした新たな社会ニーズの出現など100年に1度と呼ばれるような様々な劇的な変化が起きている。スマート社会におけるシェアリングサービスの出現や、自動車の電動化などはその典型であるが、同じような産業構造そのものを大きく変えるポテンシャルを持つ話題は枚挙にいとまがない。先に述べた自動化

ニーズが高まっている状況において、自動化への投資額は大きく、予測不能な変化の状況の中で、投資回収前にシステム寿命が来てしまうリスクが高まっており、その対応策を講じていくことは、製造業にとって死活問題となる大きな経営課題である。すなわち、世界的に自動化ニーズが高まっている一方で、環境変化が激しく投資リスクが急激に増している中で^[4]、リスクを低減可能な自動化生産システムの構築が極めて重要な課題である^{[5][6]}。

このような市場の変化に追従しグローバルでの競争力を維持する方策には2つの方向性が考えられる。製品1台当たりの設備コストを低減するために、投資した設備をフルに活用し累計生産量を増やすことによりコスト低減を実現する方法と、徹底的なムダの削減を通じて必要な設備量を減らし設備にかかるコストそのものを低減する方法である。前者の累計生産量を増やす方法は、一般的には設備のフレキシブル性を増し、市場の変化が起きても追従可能な能力を有することにより実現する。そのような生産システムは、フレキシブル生産システムという言葉で代表とした、変化に追従可能な生産システムとして長年研究されてきた。生産システムの歴史を振り返れば、1910年代に発明されたFORDシステムが近代大量生産方式の幕開けと言える。これまで工芸的に一品ものとして手作りで作られていた工業製品の生産は、ベルトコンベアによる分業生産と、それを成立させる部品の標準化をベースとした互換性確保の考え方の導入、そしてTaylorが提案した科学的時間管理法^[7]により、一気に生産性を上げモノづくりの世界の常識を変えた。FORD生産方式は単種の同一製品を効率よく作る優れた生産システムであり、その後1946年にAutomationという言葉を使い自動化の原点を作った^[8]。その後の生産システムの歴史は、高い生産性を維持しつつも市場のニーズに対応した多品種製品への対応との戦いと言っても過言ではない。まずは製品品種と生産量の関係において、その領域ごとに様々な生産方式が発明され、各製造分野に適用されてきた。精密工学会による生産量と種類をベースとした生産システムの分類はその典型である^[9]。生産の基本方式として、ショップ生産から流れ生産に移る中で、製品種と量によって生産システムを使い分ける時代を経て、90年以降、FMSを代表とするフレキシブル生産システムの研究が盛んになり、様々なシステム開発が進んだ^{[10][11][12][13][14]}。近年ではReconfigurable manufacturing systemを代表とする新しいコンセプトも生まれ^[15]、最近のインダストリー4.0^{[16][17]}の流れにつながっている。著者が所属する(株)デンソーにおいても、90年代以降、積極的な生産システム開発に取り組み、多くの新しい生産システムを生み出し実用化してきた^{[18][19][20][21]}。

これまで述べてきた世界の中での生産システム開発、および(株)デンソーにおける一連の生産システム開発は、大きな投資をとまなう生産システムにおいて、その投資から生まれるメリットを最大限享受するために、生産量確保が主眼に置かれていたと言える。柔軟性を向上させ市場の変動が起きても投資が回収できる

数量を確保することを目的とし、異種製品を同時に流す加工や組立技術開発、ラインバランスやラインスピードの改善による能力向上、さらには数量変動に応じて設備の抜き差しを容易にし、製品1台当たりの設備コストを一定に保つシステムなど、さまざまな手法を用いて品種の変動に強く、また安定的な生産量を確保するための多くの努力がなされてきた。市場変動により数量が減った場合の事業に与えるリスクを極力小さくするための努力である。これらの視点による生産システム開発は、いまでも継続して行われているが、実務的な観点で見れば、増やす方は比較的容易に対応できても、減らす方の対応が困難であることや、フレキシブルである範囲は前提があり限定された領域での対応であるので、その予測を超えた状態が起きれば機能しないというような問題もある。

一方、コスト競争力強化および投資リスク回避の視点で考えれば、投資に見合う数量を確保することと並んで、投資額そのものを抑える事も同等に有効であり、重要な研究テーマの1つであると考えられる。投資額の削減という視点では、各企業などで継続的に活発な活動はなされているが、それらは個別特殊解としての対応であり、オートメーション・ラインの投資コストを削減する汎用的な取り組みは、これまでほとんど検討されていない。上述のように、世界的に自動化ニーズが高まっている一方で、環境変化が激しく投資リスクが増していることから、リスクを低減可能な自動化生産システムの構築が強く求められている。本研究は、この視点に基づき、図4に示すように従来注目されてこなかった設備費を低減する汎用的手法の開発という新しい分野を切り開くものである。

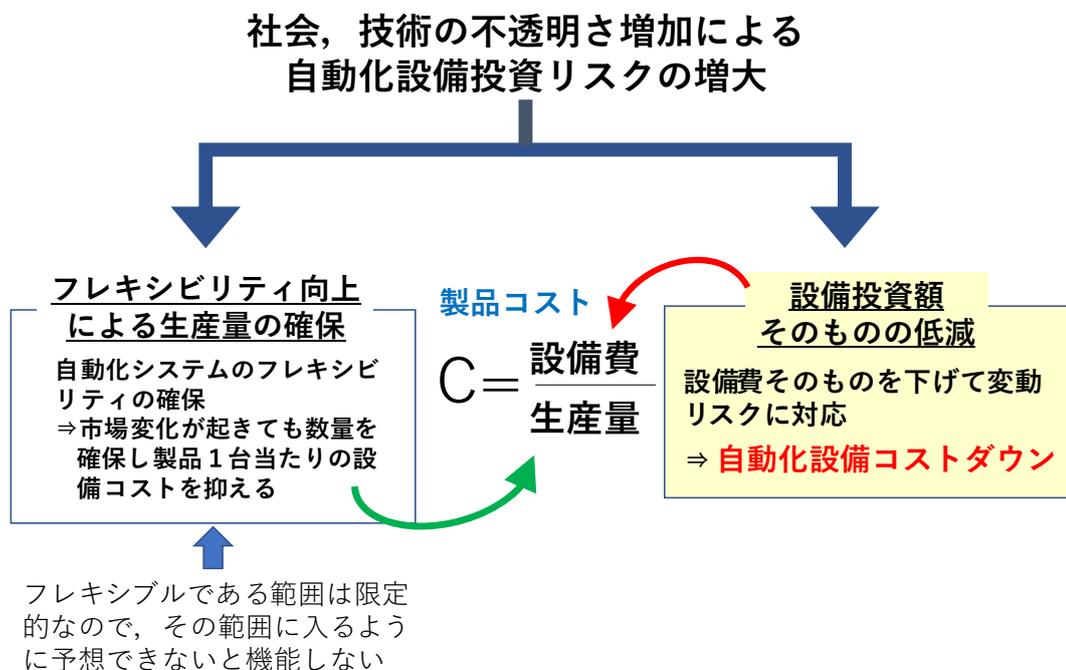


図4 本研究テーマの生産システムにおける位置づけ

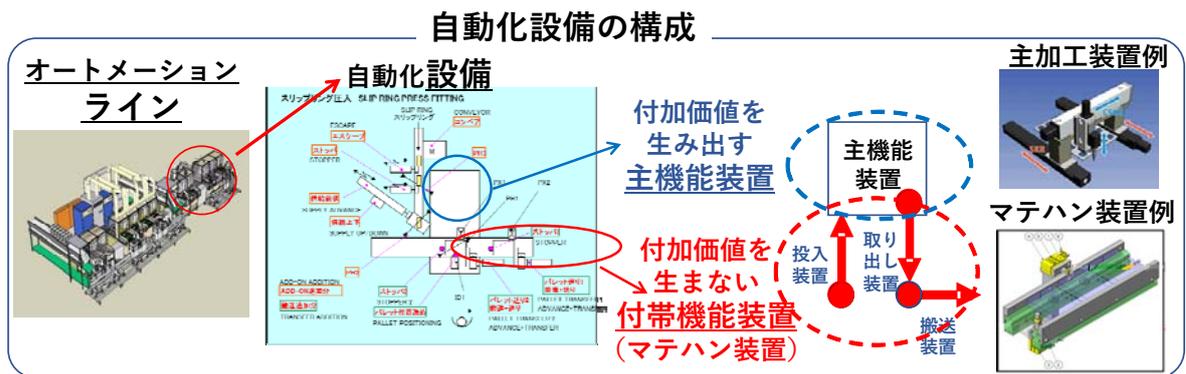


図5 ライン，設備，装置の定義とその構成

オートメーション・ラインは図5に示すように複数の自動化設備の連結により構成されている。これらのそれぞれの自動化設備は、主機能を実現するための装置である主機能装置と、主機能を成立させるための付帯機能を実現する付帯機能装置で成り立つ。主機能とは対象となる製品の付加価値を上げ製品そのものを作りこんでいく機能である。付帯機能は主機能を成立させる付帯的な役割を担う機能であり、これらはマテリアルハンドリング（以下、マテハン）機能と言い換えることが可能である。

分析の詳細については2章にて述べるが、設備費の費用構成を見てみると、主機能にかかる費用はおおよそ60%程度であり、付加価値を生まないマテハン機能に約40%もの大きな費用が掛かっている。さらにこの40%のマテハン機能を実施する装置の動きを分析すると、その稼働率は極めて低く、平均で25%程度であり、75%は待機状態として遊んでいる。このことはリーン生産の概念からとらえれば、大きなムダであると言える。

主機能は製品構造により決められる個別固有工程であり、製品競争力に直接的に寄与している。したがって、汎用的な方法で装置コスト削減を議論する事は困難である。一方、残りの約40%は設備間の製品/部品移動や主機能とのやりとりのための部品授受など、マテハン装置のコストであり、これらの機能は製品に関わらず基本的に同じであり、汎用的機器で実施することが一般的である。したがって汎用性があり、かつ大きなムダが存在しているマテハン機能のコストダウンを研究対象とした。

コストダウンの考え方としては、マテハン装置の非稼働時間の大部分が待機状態であることから、リーン生産における作業者に発生するムダ時間の削減の考え方や方策を取り入れて、低コストのマテハンシステム（マテハン装置群）を構築する。

1.3 研究の目的

1.2 で示した自動化投資リスク低減のアプローチの考え方に基づき設備コスト削減を実施する本研究の目的は以下の通りである。

従来のオートメーション・ラインは、マテハン装置の稼働率が非常に低くムダが多いのに対して、稼働率の高いマテハンシステムを実現して、設備コストを低減する。マテハン装置の非稼働時間（ムダ時間）の削減には、リーン生産におけるリーン化（ムダ削減）の方策を適用する。それにより、マテハンシステムの設備構成における従来の考え方を変更して、リーン化された革新的マテハンシステムを実現する。

開発する革新的マテハンシステムはリーン生産の概念を取り入れた新しいコンセプトのシステムであり、これを有する生産ラインの自動化をリーンオートメーションと呼称する。本研究では、まずリーンオートメーションの概念設計を行い、その後、具体的な製品に適した生産ラインの設備構成を設計する際に必要となるマテハンシステムの設計方法を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。1 章では研究の背景と目的を述べた。以下 2 章では、新たに狙うマテハンシステムのコンセプト（リーンオートメーション）を明確化すると共に、リーンオートメーションシステム構築の課題を整理する。3 章では、リーンオートメーションシステムを成立させるためのマテハン機能の記述法と使用装置との関係明確化に関する考え方を整理し、設計手法に必要なマテハン機能の属性表およびマテハン装置のライブラリ作成方法について述べる。4 章で詳細設計手法について述べ、5 章にて確立した設計手法の有効性を確認するために実例を用いた検証・評価について述べる。続いて 6 章にて結論を述べる。

2. リーンオートメーションの概念設計

2.1 リーン生産におけるムダ

MITのJames P Womackが世界で初めてLean Productionという言葉を使用した^[22]。そのベースには、よく知られているようにトヨタ生産方式（TPS）がある。TPSは現場を改善する手法として有効であるが、その内容を生産システムとして体系的にまとめあげ、TPSの本質であるリーンという言葉を用いることにより、リーンプロダクションは現在では世界で認知された生産方式として確立されている。本研究テーマのタイトルであるリーンオートメーションは、このリーンプロダクションのリーンという言葉を用いて、思想を表現している。1章にて本研究が着眼するオートメーション・ラインにおけるマテハンのムダのポイントについて述べたが、リーンオートメーションの詳細に入る前に、リーン生産とオートメーション・ラインの関係について簡単に整理をし、本研究が目指すリーンオートメーションの位置づけについて述べる。

リーンプロダクション構築時に使われる汎用理論の中で、ムダを体系化してまとめたものの代表としてTPSにおける7つのムダがあげられる^{[23][24]}。これらの7つのムダに対して、改善すべき分野という観点で分析を行うと、表1に示すように、生産管理分野の改善で解決すべきムダ、品質管理分野の改善で解決すべきムダ、そして作業管理分野の改善で解決すべきムダの3つの切り口に分類する事が出来る。

作りすぎのムダや在庫のムダ、運搬のムダなどが生産管理分野の改善で解決するムダに該当する。これらのムダを抑えるためにはムダの存在を見える化し、ムダを抑制する生産の指示やレイアウトの変更などが必要となる。作りすぎのムダを抑制するためには、それに付随して2次的なムダとなる在庫のムダの低減が必要となり、在庫のムダを低減するためには、生産のリードタイムを縮める事が必

表1 TPSにおける7つのムダと改善領域分類

	生産管理分野の 改善で解決	品質管理分野の 改善で解決	作業管理分野の 改善で解決
①作りすぎのムダ	✓		
②在庫のムダ	✓		
③動作のムダ			✓
④手待ちのムダ			✓
⑤加工のムダ		✓	
⑥運搬のムダ	✓		
⑦不良・手直しのムダ		✓	

要で、それを実現するために3次的なあらゆるムダの低減が必要となる¹²⁵⁾。それらは、結果的に後で述べる「品質管理分野の改善で解決すべきムダ」、「作業管理分野の改善で解決すべきムダ」につながる。

次に品質管理分野の改善で解決すべきムダであるが、加工のムダや不良や手直しのムダが該当する。解決のためには品質向上技術の進化が必要である事は言うまでもない。これは自動化・手作業に関わらず共通の問題であり、生産技術そのものの改善が必要な項目である。

そして最後に挙げられるのが、作業管理分野の改善で解決すべきムダである。動きのムダ、手待ちのムダが該当する。これらは製造現場で生じる生産リソース（作業者）のムダであり、製造コストに直接的に影響し、また削減の効果も見えやすいことからリーン化の対象として重要であり話題になることも多い。生産管理面での改善や品質管理面での改善は、一般的には手作業と自動化の区別なく進められるが、作業管理面での改善はもっぱら作業者の動作のムダに注目されており、その概念と汎用的改善手法は手作業にしか適用されてこなかった。この事から、生産ライン内へのリーン化への取り組みとしては、手作業主体のラインにおける動作のムダや手待ちのムダを捉えて議論する事が多く、これらの切り口でリーンという概念がオートメーション・ラインに適用されることはほとんど無い。手作業におけるムダ改善の考え方を、同様にマテハン装置の動きや手待ちなどに適用すれば、装置の不必要な機能を下げることや、作業統合化による装置台数削減などを通じてコスト削減できる可能性がある。従来の手作業ラインの生産リソースが人（作業者）であるのに対して、対象が自動化装置という違いはあるが、本研究は、リーン化の狙いとして「作業管理分野」でのムダを対象とした研究である。

2.2 手作業ラインのリーン化の考え方

リーンなオートメーションを考えるにあたって、リーン化のポイントを明確化するために、まずはこれまで一般的に実施されている手作業ラインのリーン化の考え方について述べる¹²⁶⁾。

手作業ラインにおけるムダの発生は設計の考え方に依存している。その考え方は次の通りである。なお、本検討において対象としているのは、流れ生産においてラインを形成する場合を考える（ラインとしての考え方を明確化すれば、セルやジョブショップのような生産形態でも、同様の考え方を適用可能である）。

i) 製作機能・順序の設計を行う。

製作機能とは製品を成立させるための要素作業であり、主機能である。

これらの主機能の順序の設計とは、主機能にかかる時間と先行関係図を作成することである。

ii) サイクルタイムと工程数の決定。

必要生産量と設定可能時間の関係から、サイクルタイムを設定する。そのサイクルタイムに見合う工程数を決定する。

iii) 工程への主機能と付帯機能の割り当て

流れ生産における各工程間への主機能と付帯機能を割り当てる。付帯機能とはマテハン機能に他ならない。

iv) 作業者の配置

割り当てられた主機能と付帯機能に対し、人が作業実施可能な時間を基に作業者を配置する。

ここで、工程とは「原材料が加工されて製品化される生産活動の進行過程」のことであり、作業員・機械・方法で構成されている。

このような手順によって設計されたラインにおいて、一般的には工程に配置された作業員の負荷が不均一になるラインバランスが取れない状態となり、結果作業員の手待ち現象が発生する。その要因は次に示す主に3つになる。

要因① 計画した工程の作業時間と実施の作業時間の誤差が大きい。これは作業員に任せた作業方法では余分な時間がかかり動作が安定していない、すなわち、3S（単純化、標準化、専門化）など動作経済の原則にあった作業となっていないためである。

要因② 作業員の能力に差があり、担当できない作業がある。これにより結果的には工程への作業員割り当ての自由度が減りムダが発生する。

要因③ 治工具や部材の供給といった作業スペースの制約から、1工程に割り当てられる作業数が少なくなる。これにより工程への作業員割り当ての自由度が減りムダが発生する。

これらの手待ち現象を解決し、リーン化をすすめるための対策は、次の3つが挙げられる。

対策① ワークスタンダードの設定⇒作業の手順や動作のムダを分析・改善して、作業員が短時間で安定した作業が行える作業標準を設定する。

対策② 多能工化の推進⇒設備や治工具を使う作業は熟練（スキル）が必要なため、訓練して作業員が対応できる作業の種類を多くする。

対策③ 多工程持ちの推進⇒作業員が1工程のみの作業を分担するのでは作業員間の作業時間に大きな差が出るので、作業員が複数の工程を担当して工程を移動しながら作業を行い、作業員間の作業時間の差を少なくする。セルライン生産方式と言われる場合もある。

作業標準を設定した上で、多能工化、多工程持ち化された手作業ラインの改善においては、主機能や付帯機能の区別なく、全機能を時間という1つのパラメー

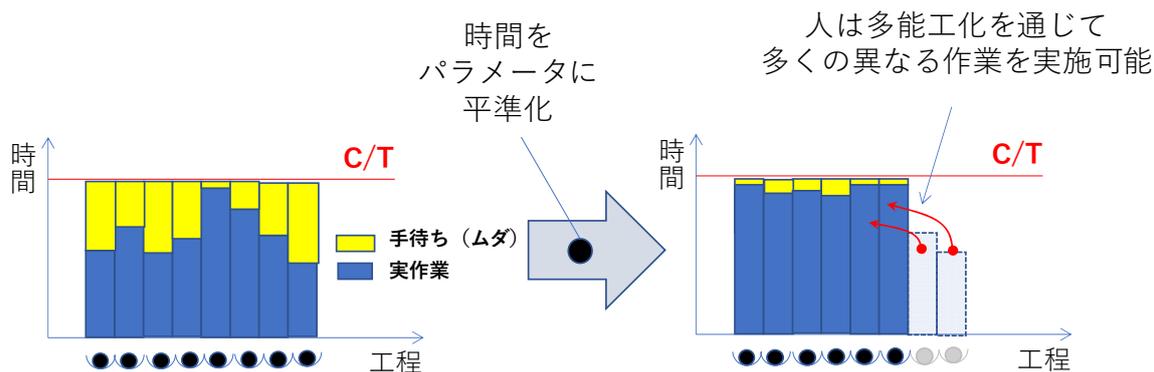


図 6 手作業ラインにおけるムダの改善方法

タのみを用いてムダを削減し平準化を行うのが手作業リーン化の特徴である。図 6 はその概念を簡単な事例を用いて表した図であるが、工程ごとに様々な手待ちのムダがある場合、すべてのムダを時間で分析し、そのムダを無くすために、作業への作業分担を見直すと共に作業内容そのものを改善し、ムダを極小化していく。これらの改善作業が行えるのは、人は多能工化を通じて、作業内容と場所を問わず、広範囲なマテハン機能を実施可能であるためである。このような改善作業が実施できる手作業ラインにおいては、ムダの最小化は、そのまま動作効率最大化となり、コストの最小化を狙う事と、ムダの最小化を狙う事は同義となる。

2.3 オートメーション・ラインのリーン化

2.3.1 手作業ラインとオートメーション・ラインのリーン化の違い

オートメーション・ラインにおいて、手作業ラインでの作業者に相当するものは自動化装置となる。2.2 で述べた手作業ラインのリーン化と比較して、オートメーション・ラインで対象とするムダは、自動化装置の動作のムダと手待ちのムダで同じである（自動化装置の手待ち時間は、以降手作業の手待ちと区別するために待機時間と表現する）。手作業と自動化装置の間で違うのは、生産リソースが人（作業員）から装置になったことである。この作業員から自動化装置に代わることにより、ラインに投入された部材を製品として完成させる製作過程の区切り（扱う機能を区切る単位）である製作機能とその実行順序の設定に関する考え方が異なる。手作業ラインの製作機能は汎用的な能力を持つ「人」が実行する作業として、初めから一括して設定することができる。一方、オートメーション・ラインでは、製作の方法を考え始めた時点では、設備仕様が決まっておらず、必要とされる製作機能が決まった後から実行する設備仕様を設計する。したがって、

作業や動作の仕方として製作機能の設定はできず、部材を製品にするのに必須の変換機能（付加価値を生む正味製作機能）である主機能をはじめに設定し、その機能を実現する設備の基本構造を設計する。製品を完成するには、その主機能を実行する設備のみでは不足しており、部材を主機能間で移動する、設備への投入・取り出しをする、といった付帯的な製作機能が必要となる。この付帯機能は一般的にはマテハン機能と呼ばれる。主機能が固有の製品仕様（構造や品質要求仕様）に従った個別・固有の仕様となるのに対して、マテハン機能は言葉の通りモノを取り扱う作業として複数種の機能タイプに分類できる。したがって、個別の設備に対するインターフェース作業機能としてマテハン機能の仕様は設定される。このマテハン機能は、通常は主機能設備ごとに要求される機能を実行できる設備構成を設計する。

このように設計される自動化装置に仮に待機時間のムダがあり改善しようと考えた場合、自動化装置には各装置の機能に制約があると共に、各装置に応じた個々の費用が存在するため、手作業のように、容易に作業の変更を行う事が出来ない上に、変更の良し悪しを時間だけでは測れない。例えば、2つの自動化装置が存在し、両者ともに非常に負荷が低いので、それらを合わせて1つで実施し待機時間のムダを削減しようとした場合、2つの機能が対応できなければいけない事から、自動化装置そのものの設計見直しが必要であり、その結果装置そのもののコストが上がる。もし、新たに選んだ装置のコストが、改善前のそれぞれに分かれた装置の総コストより高い事になれば、機能を集めて稼働率を上げ装置の待機時間を無くしムダを削減しても当然トータルコストは上がる事になる。この時のムダとコストの関係を表せば、機能を集めて自動化装置数を減らし、装置の「待機時間というムダ」を無くすことが可能な一方で、自動化装置は必要とされる機能の中で、もっとも高い機能に合わせた装置が選定されるため、低い機能に対しては、自動化装置そのものが持つ機能に余剰が発生し、そこに機能としての新たなムダが発生するという事になる。自動化装置の場合、人と違って機能の制約と装置ごとにコストが変わるという特徴があるためにそのような事が生じる。そのような性質の違いを考慮に入れた上でリーン化を考える必要がある。

2.3.2 オートメーション・ラインでの動作と待機時間の排除

自動化装置における動作のムダと待機時間のムダ、それぞれについてその排除の方法について述べる。

i) 動作のムダの排除

自動化装置は作業者と異なり所与の生産リソースでなく、担当する製作機能に

合わせて個別に設計される。設備設計の際には、設計者はムダのない動作の機構を考えるとという必然性があることから、従来の自動化でも動作のムダの排除は対応できている。ただし、作業者と異なり装置構造（仕様）の違いでコストが大きく異なるため、目標とする時間内で作業を完了するという制約下で最小コストの仕様とする必要がある。これらのムダは装置の構造に関わらず、従来設計法においても常に対応できていることであり、動作のムダに新たな対応すべきことは無く、従来と同様の設計法で問題ない。

ii) 待機時間の排除

オートメーション・ラインでの設備設計では、まずリストアップされた主機能の内容と先行関係を判断しながら、生産の流れに沿って主機能群を実行するための区切りを設定する。つまり主機能群を分割して、初工程から最終工程にいたる生産工程ごとで実行する主機能が決まる。この工程単位に割り当てられた主機能を対象として主機能設備は設計される。

主機能設備の手待ちをなくするためには、主要設備の処理（作業）時間を全工程で均一にすることが必要である。手作業ラインでは、工程間の作業時間を均等にするために工程で担当する作業（製作機能）を変更することが行われる。しかし、オートメーション・ラインにおいては、主機能群の分割は製造技術面からの制約からあまり自由度がなく、生産工程ごとに実行する主機能を変更することは現実的ではない。したがって、生産速度を考慮して設定された目標時間（正味作業のサイクルタイム）を目指して各設備の仕様を決定する。ただし処理時間が目標時間をオーバーしない範囲で最低コストとなる設備仕様を選択する。これにより、主機能設備の待機時間は、設備設計において大部分が決定する。

各工程の主要設備の仕様が決まった後、各工程の主機能設備で必要とするマテハン機能を抽出できるため、それに基づきマテハン機能の内容と順序を設定し、そして装置の設計を行う。

従来のオートメーション・ラインでは、図7に示すように、主機能設備ごとのマテハン機能のみを対象として、個別に装置の設計を行っている。マテハン装置の設計にあたっては、主機能設備の稼働を妨げないタイミングでマテハン機能を実行できることが重要であるが、付加価値を生まない機能であるために低コストの装置とすることも考慮される。

詳細は後述するが、主機能設備の処理時間に比べて、マテハン装置の処理時間は大幅に短いものになるため、生産の流れ間隔時間（サイクルタイム）中で稼働している時間は極めて短い。つまり、工程ごとに分断されたマテハン装置では実行する機能の量が少なくなり、マテハン装置に長時間の待機時間が発生している。

したがって、手作業ラインでのリーン化の方策である多工程持ち・多能工化の考えをオートメーション・ラインのマテハンシステムに適用して、複数の主機能

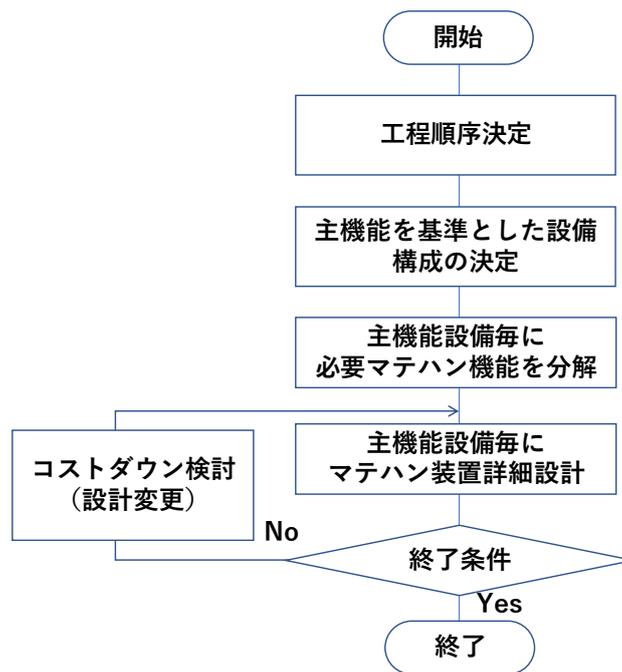


図7 従来のオートメーション・ラインの設備設計手順

のマテハン機能に対応できる多機能のマテハン装置を構築することが不可欠となる。なお、マテハン装置の設計においては、複数のマテハン装置から構成されるマテハンシステムのコストと主機能設備の稼働への妨げ（生産間隔時間：サイクルタイムが長くなる）の両者を考慮しなければならない。

2.4 マテハンシステムの稼働率向上の重要性

2.4.1 マテハン装置のコスト割合

オートメーション・ラインにおけるマテハンシステム研究の重要性を確認するために、マテハン装置にかかる費用（設備費）の分析を行った。設備費分析にあたり注目したのは、設備構成の中で付加価値を生み出す部分、いわゆる主機能部分と、付加価値を生まない部分、いわゆるマテハン機能に分割しての設備費分析である。2.3.2の図7に示すように、自動化設備は一般的には付加価値を生み出す主機能部分を基準にして設備構成を行い、この主機能をベースに、与えられた生産の条件から設定されるサイクルタイムを満たすために製品・部品の投入取り出しや姿勢変更などを行うマテハン機能が存在する。このマテハン機能は主機能を成立させるための補助機能であり、製品そのものの付加価値を上げることは無い。付加価値を生み出さないとすれば、そこに掛けるコストはすべてムダであるとい

える。主機能は製品付加価値を生み出す重要機能で、生み出す価値とそこにかけるコストの関係を考えながらコストダウンを図っていく必要があり、各企業はまさに主戦場として常にコストダウンを行う活動を行っているが、一般的には主機能は製品固有の機能であって、これらを対象に汎用的な解を見出すことは困難であると考えられる。一方、付帯機能であるマテハンは、いかなる工程にも存在し、汎用的な機能であるので¹²⁷⁾、この部分を対象としたコストダウン手法を見出すことが出来れば、その効果は非常に大きいと考えられる。そこに着眼して設備費分析を実施した。

設備費分析にあたり、設備の総費用を設備本体製作に必要な直接原価と設計費などの間接費に分類する。直接原価の方は設備本体にかかる費用 A_1 とマテハン装置にかかる費用 B_1 に分ける。直接原価の中には A_1 、 B_1 に分類できない組立調整費などがある。これらの明確に分類できない直接原価および、同様に明確に分類が出来ない間接費については、 A_1 と B_1 の比率を用いて割り振る事とした。全体の分類構成を図 8 に示す。

図 9 に一般的なラインの事例を示す。該当ラインは主機能として、加工機が 3 台並んだ後、組立、かしめ、検査と続き完成品取り出しとなる。加工機および組立、かしめ、検査は主機能装置として青色で示してある。部品の搬送や供給、設備内出し入れのための装置、そして完成品取り出しはマテハンとして、黄色、黄

$$\text{マテハン装置コスト比率} = \frac{\Sigma B_i}{\Sigma A_i + \Sigma B_i}$$

設備費	間接費	<ul style="list-style-type: none"> ・マークアップ ・据付工事費 ・設計費 	$[A_3]$ $[B_3]$	A_1 と B_1 の 比例配分
	設備の直接原価	<ul style="list-style-type: none"> ・部品加工、処理費 ・組立調整費 	$[A_2]$ $[B_2]$	
		設備本体・他	$[A_1]$ 加工・組立・検査本体	<ul style="list-style-type: none"> ・完成外注機 (成形機、プレス機 等) ・内製加工機 (設備ベース、制御盤・操作盤、加工・組立・検査ユニット本体、組立専用ロボット&ハンド、インデックスマシン、計器・モニター類 等)
			流動制御	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザーマーキング装置、生産指示装置 等
			周辺機器	<ul style="list-style-type: none"> ・クーラント処理、集塵機、ランナー粉碎機 等
			他	<ul style="list-style-type: none"> ・安全カバー、柵 等
		マテハン	部品供給	<ul style="list-style-type: none"> ・パレタイザ、部品投入用ローダー(ロボット)&ハンド ・パーツフィーダー、フープ供給機、アンコイラ 等
			部品搬送	<ul style="list-style-type: none"> ・メイン&リターンコンベア、グリッパ、シャトル ・ワーク反転機 ・搬送パレット、コンベア上のストップ・センサ類 等
			投入排出	<ul style="list-style-type: none"> ・設備本体への投入排出ローダー&ハンド ・サブ組からメインコンベアへの投入ローダー&ハンド ・不良品排出ローダー&ハンド 等

図 8 マテハン装置コスト分析のための設備費分類

緑色，オレンジ色で示してあり，その色は図 8 に示した分類に使用した色と揃えてある。

図 8 に示した分類を使用し，(株)デンソー内の代表的なラインのコスト分析を実施した．いくつかの事例について詳細説明する．図 10 はガソリンエンジンにおいて燃料を供給するシステムに用いられる燃料をくみ上げるポンプの組立ラインである．分野としては中小物組立である．製品は小型モータであるので，回転子，ブラシ，磁石などを順次組立を行い，最終的に検査を実施する．全 35 ステーションの全自動ラインであるが，当該ラインにおけるマテハン装置にかかる費用は 37% となっている．

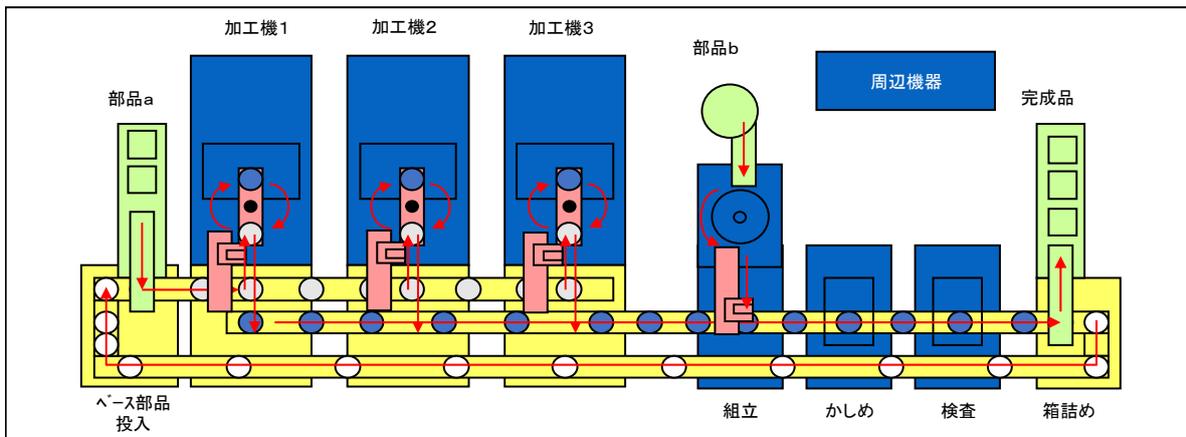


図 9 主機能装置とマテハン装置の構成事例

ガソリンエンジン用ポンプ組立ライン

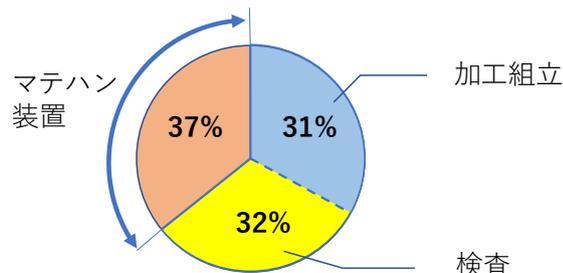
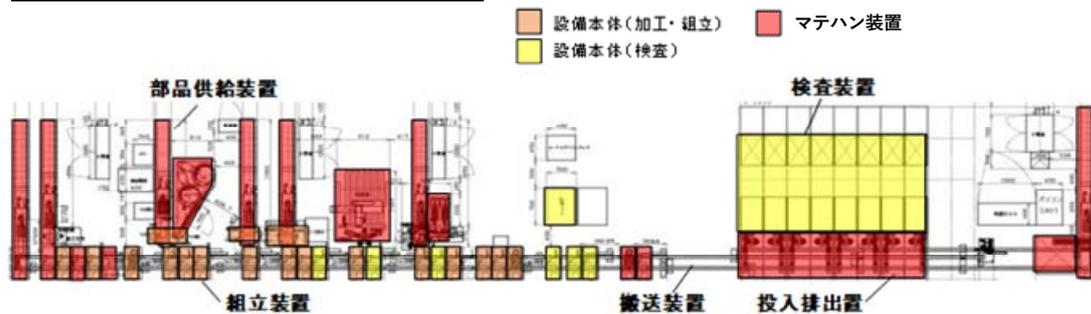


図 10 中小物組立ライン設備費分析事例

単体機（成形機）

①成形機	1290万円
②周辺機器（ホッパー、ランナー-粉碎機）※1台能力換算	176万円
③取り出しロボット	410万円
④箱詰め機	210万円
計	2086万円

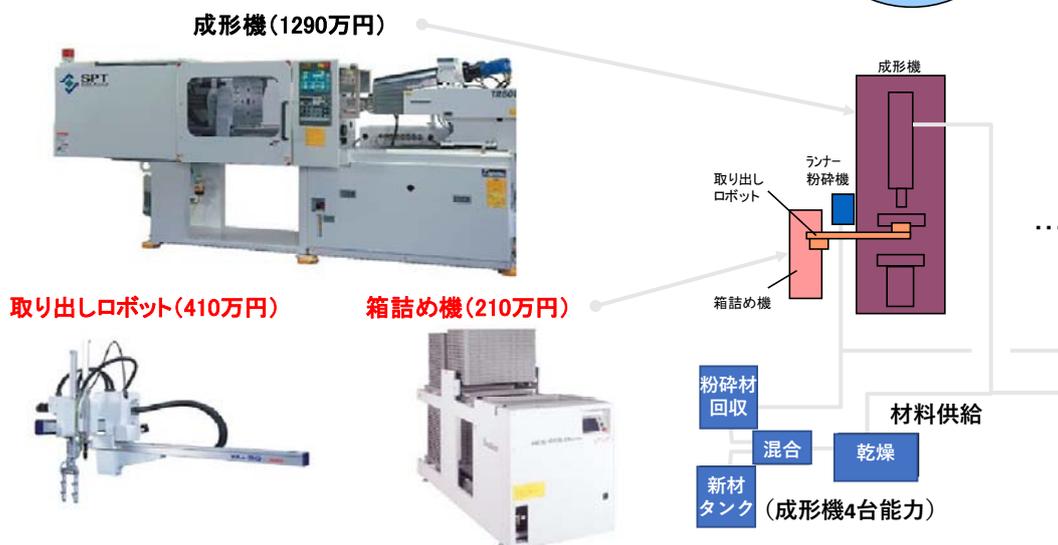
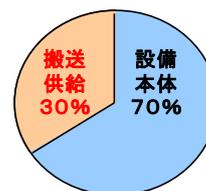


図 11 自動成形機での設備費分析事例

もう1つ事例を示す。図11は成型機を用いた成形&箱詰め装置である。成型加工後自動で取り出しを行い、不要部分であるランナーを分割し完成品を箱詰めする機能を有している。全自動ラインのように設備間搬送や部品の供給は無いが、システムとして部品の取り出しや箱詰めなどのマテハン機能がある。ラインではないので主機能である本体機能のコストが大半を占めるようなイメージがあるが、このようなライン化されていない小さいシステムにおいても自動化を行うとマテハンに30%の費用が掛かっているのが分かる。

2つの典型的な事例を示したが、その他の分野含めた分析結果を表2に示す。表中にある代表ライン欄の名前は、(株)デンソーにおける製品名で表されており、それぞれのラインがどの製造分野に属するものなのかを表中に「分野」欄に表した。マテハンコストが全体の設備費の中でどのような割合を占めるかという分析において、対象となる分野ごとに大きく異なる可能性があると考え、(株)デンソー内にある代表的な全分野を揃えてある。例えば切削加工と組立は全く設備の構成が異なるため、マテハンも異なる可能性がある。選択した分野は、大きく分ければ、組立と加工に分けられ、組立においては、サイクルタイムの差によりマテハンも大きく異なる。表中の中小物組立領域のサイクルタイムは5~20秒程度、大物組立は20~50秒程度が一般的である。また表中の「熱交換機」は専用機設計であり特殊な設備構成である。

表 2 オートメーション・ラインにおけるマテハン装置コスト比率

分野	ライン名	流動開始 時期	マテハン装置 コスト比率
中小物組立	ガソリンポンプ組立・検査ライン	04/5~	37%
造形切削	ディーゼル部品ボデー切削ライン	05/4~	35%
	ブレーキ用部品シリンダ加工ライン	06/8~	30%
センサ	超音波センサ成形ライン	05/10~	43%
ECU	エンジン制御ECU組立ライン	06/2~	38%
熱交換器	エバポレータ加工組立ライン	05/10~	29%
大物成形組立	エアコン組立ライン	99/5~	48%
スタンドアロンセル	ガソリンポンプ部品成型セル	04/5~	30%

結果は表 2 に示すように組立，加工を問わず，あるいは機械系部品や電子部品領域などの製品を問わず，製品付加価値の付かないマテハンにかかるコストは 30%から 40%を占めている事が分かる．調査対象ラインのマテハンコスト比率平均は 36.3%となるが，全対象ラインの設備費絶対値を用いて平均すれば，マテハン装置にかかるコスト比率は平均 41%となる．

2.4.2 マテハン装置の稼働率

2.4.1 にて，付加価値の無いマテハン機能に多くの費用が掛かっている事が分かったが，このマテハン機能におけるムダを排除し，極力効率よく低コストでマテハンを実施するという視点で，各マテハン装置の動きに関する分析を実施した．分析においては，オートメーション・ラインにおける各マテハン装置の機能をすべて分解し，各機能が行う時間のサイクルタイムの中での割合を算出し，その値をマテハン装置の稼働率として表すことにより，どれだけの時間稼働しているか，逆に言えばサイクルタイム内にどれだけの時間止まっている時間があり，ムダがあるかを分析した．表 2 内の ECU 分野である電子エンジン ECU ラインの先頭 2 工程を事例とした分析結果を示す．図 12 は該当工程の概要を表す図である．先頭工程にてマガジンで供給された電子基板をマガジンから 1 枚切り出し，コンベア上に供給した後，次工程に搬送され，電子基板の機能検査をするという工程である．

これらの工程のマテハン機能をまとめたものを図 13 に示す．図中，横軸には各工程内におけるマテハン機能が抽出されている．それらの機能を実行するマテハン装置が縦軸に表記されており，それらマテハン装置の稼働率が右端に図示されている．

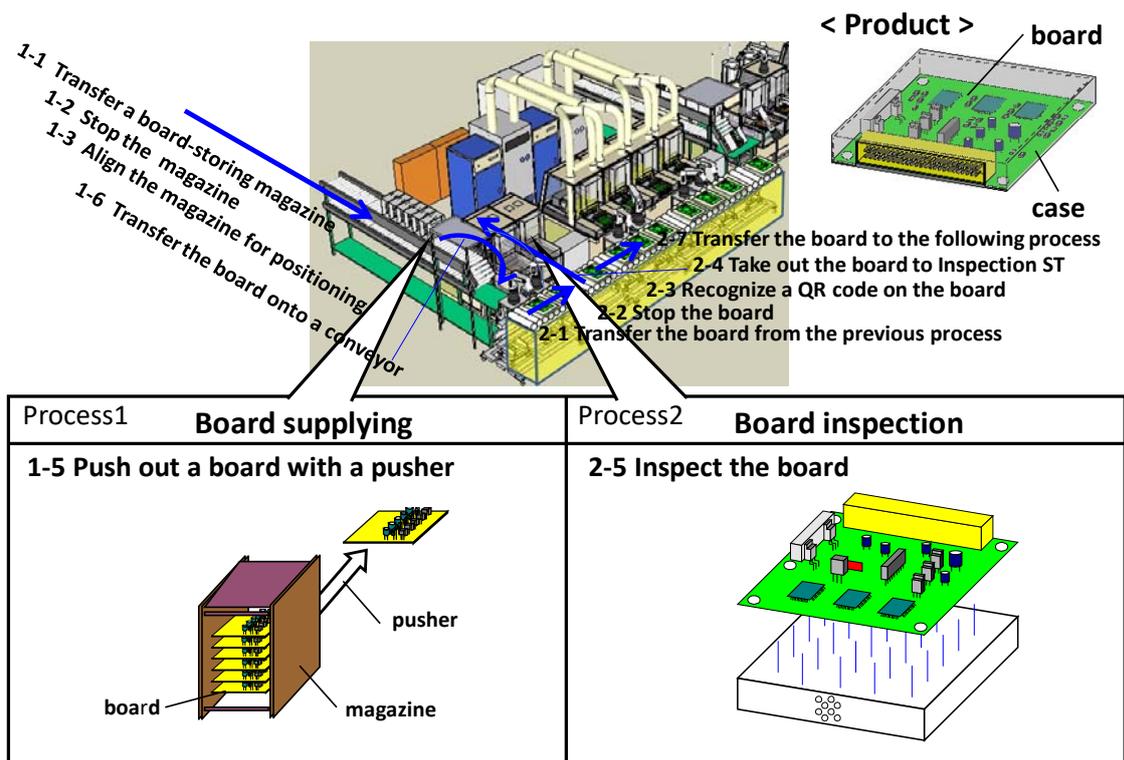


図 12 エンジン制御 ECU 組立ライン先頭 2 工程概要図

先頭工程は基板供給ステーションであるが、先頭工程にて基板が収納されているマガジンを入れ替える機能を果たすマガジンコンベアユニットは、1 マガジンあたり 2 秒しか動かない。マガジンには 10 個の製品が格納されているため、製品 1 個あたりに換算すれば 0.2 秒という事になり、サイクルタイム 15 秒に対する稼働率は 1.3%という事になる。同様にそれぞれのマテハン装置の稼働率を見てみると、ラインのサイクルタイム 15 秒に対して、ほとんどのマテハン装置は 1~2 秒で作業を終えており、それらの稼働率は 10%程度しかない。

このような分析方法を用いて、(株)デンソー内の主要ラインに関するマテハン装置の稼働率を分析し、その結果をまとめたものを図 14 に示す。多くのマテハン装置は、仕事をしている時間はわずかな時間に限られ、ラインのサイクルタイムの中で、そのほとんどを待機時間として遊んでいる実態が分かる。

加工・組立の領域に関わらず、また、サイクルタイムに関わらず、オートメーション・ラインにおけるマテハン装置のサイクルタイム内稼働率は 9~35%に分布しており、その平均値は 25.2%と非常に低い。

すなわち、設備費のうち付加価値を生まないマテハン作業はコスト的に平均 41%と多くの費用をかけている一方で、それらのマテハン装置の稼働率は 25%程度と非常に低く、そこには多くのムダが存在する。

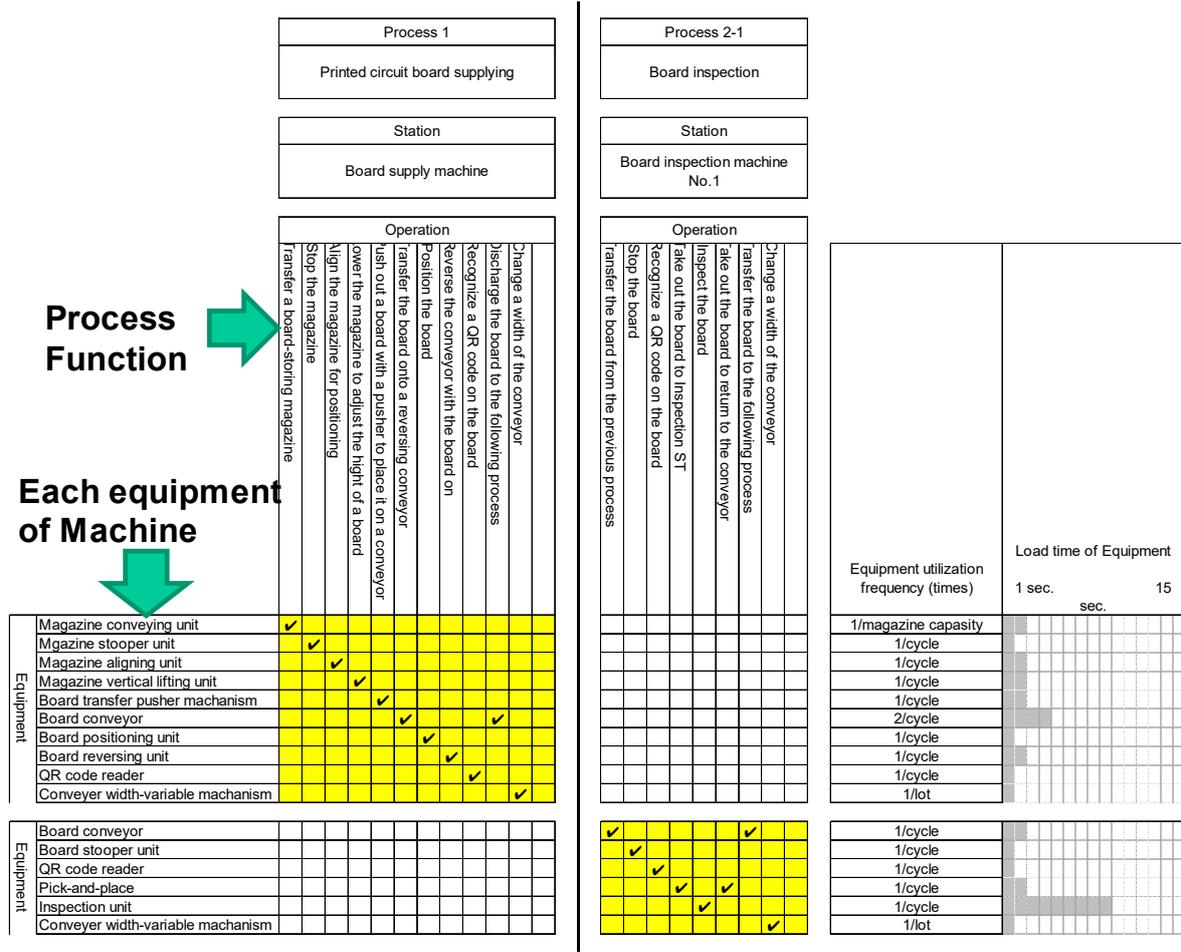


図 13 エンジン制御 ECU 組立ライン先頭工程でのマテハン装置の動作分析

先に述べたように、主機能は製品構造により決められる個別固有工程であり製品競争力に直接的に寄与しているため、一般的な方法で装置コスト削減を議論することは困難である。一方、残りの約 40%は設備間の製品/部品の移動や、主機能とのやりとりのための部品の授受など、マテハン装置のコストである。これらの機能は製品に関わらず基本的に同じであり、汎用装置で実施することが一般的である。それにかかるコストは図 15 に示すように平均で全設備費の 41%という大きなコストがかかっている一方で、平均稼働率は 25%と非常にムダが大きい。したがって汎用性があり、かつ大きなムダが存在しているマテハン機能のコストダウンを研究対象とし、このムダを削減する事により設備費を削減し、コスト競争力がありリスクに強い生産システムの構築を目指す。

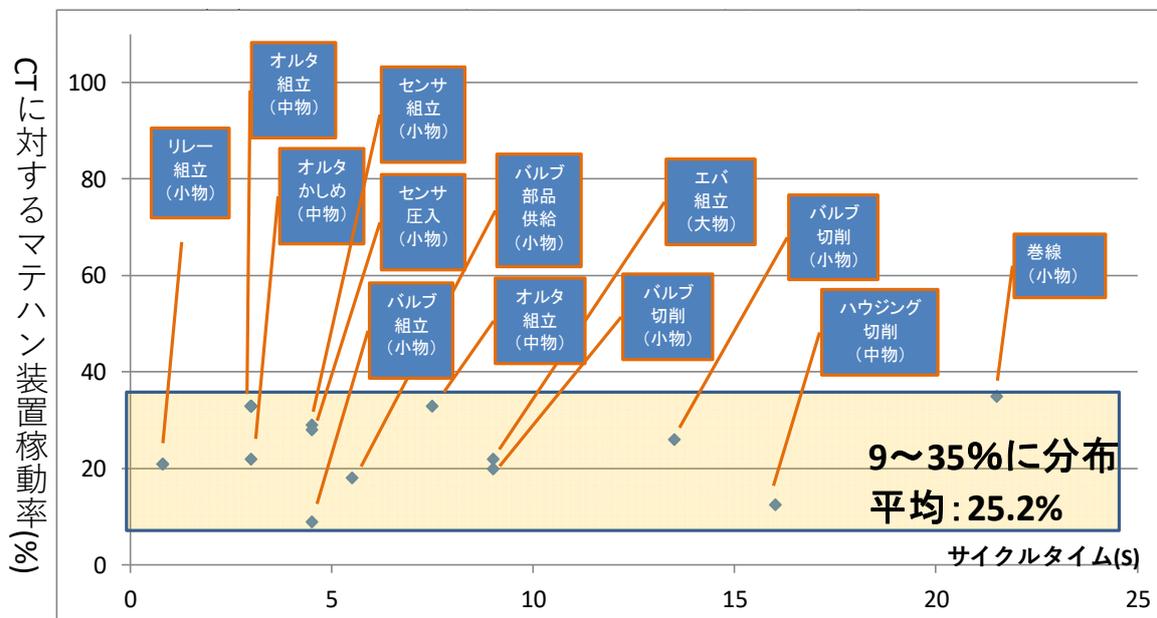


図 14 各種オートメーション・ラインにおけるマテハン装置稼働率

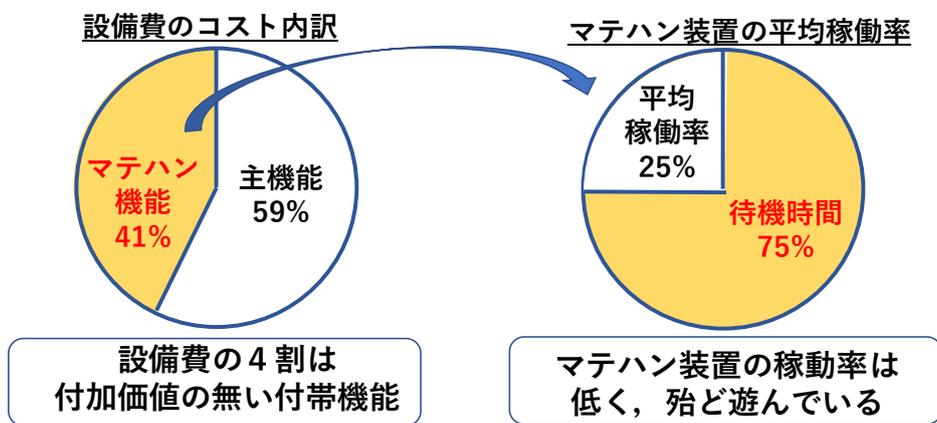


図 15 オートメーション・ラインにおけるマテハン装置コスト割合と稼働率

2.5 リーンオートメーションの概念

研究対象としている領域は、生産の流れに沿った工程ごとに主機能設備が配置されている流れ生産のオートメーション・ラインである。そのようなラインにおいて、マテハン装置の待機時間のムダのリーン化、すなわち稼働率向上を狙いとして、複数工程の主機能設備に対する複数のマテハン機能を担当できる移動型・複合機能のマテハン装置を数台設置するシステムである。これらは主機能設備とは分離したマテハンシステムとなる。システムの具体的な構成を、従来のオートメーション・ラインと比較して図で説明する。

従来のオートメーション・ラインの設備設計方法では、2.3.2の図7で示したように、主機能の順序や条件が決定された後、その主機能を主体に設備構成が決定され、それに付随する形でマテハン機能のための自動化装置が選択される。すなわち設備ごとに必要マテハンが配置された結果として図16に示すような形態をとる。図は設備ごとの機能の配置とその機能を実現する装置の配置を表したものである。図中A, B, Cは主機能を表し、A1, A2, A3, B1, B2, ...はそれぞれの主機能に必要なマテハン機能を表す。それらの各機能を実行する装置としては e_A, e_B, e_C は各主機能に割り当てられる主機能装置を表し、同様に各主機能に必要なマテハン機能に対して、 $e_{A1}, e_{A2}, e_{A3}, \dots$ がマテハン装置を表している。図中○で表す色や大きさは各マテハン機能の類似性を概念的に表してある。例えば、A1とB1は全く同じ機能であり、A3とB2は非常に近い機能を表している。A1とB1は機能の面から見れば、全く同じ装置で機能を達成することが可能であるし、A3とB2も非常に近い機能であることから装置のわずかの見直しで同じ装置で機能を達成することが可能である。そのような形で機能のグルーピングを行えば、装置の数を減らし各装置の稼働率を上げることが出来るが、図7で表したように、これらのマテハン装置は、設備ごとに設計され設置されるのが一般的であることから、図16のような配置となり、それぞれのマテハン機能に対して、 $e_{A1}, e_{A2},$

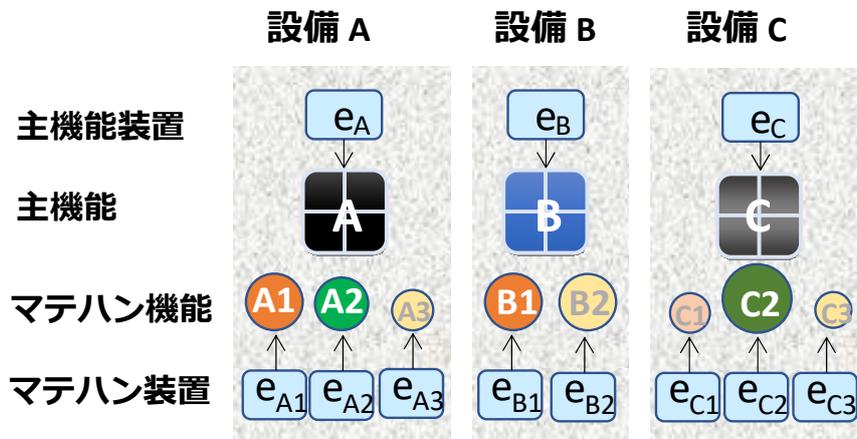


図16 従来のオートメーション・ラインの設備設計による機能と装置の配置

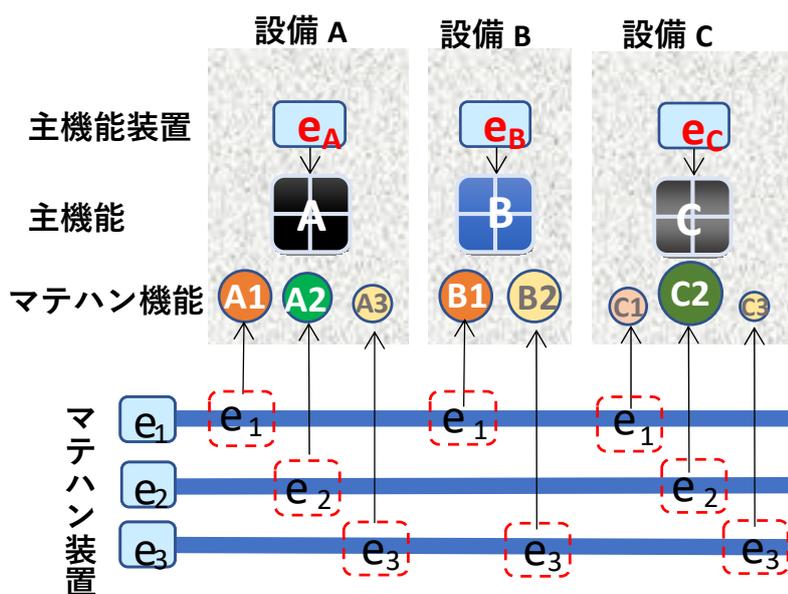


図 17 リーンオートメーションコンセプトにおける機能と装置の配置図

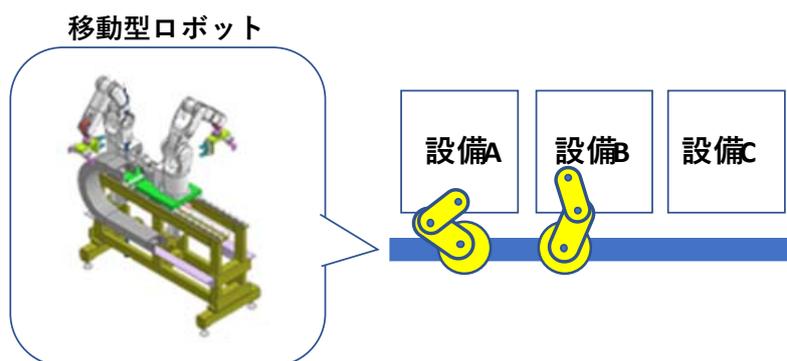


図 18 リーンオートメーションに用いる具体的マテハン装置の事例

e_{A3} , ... のようにそれぞれの装置が割り当てられる。

このような機能と装置の配置の結果、マテハン機能に使用される個々の装置は、対応する主機能に付帯する機能しか行わないために、わずかの間しか作動せずに主機能を待っているという状態となり、各装置の稼働率は非常に低い。

このような各装置の低稼働状態は、手待ちのムダに当たり、「リーン生産」の観点からは、大きなムダと言えるが、これらのムダは今まで見過ごされてきた。本研究が提案するマテハン装置の新しい生産システムの形は、図 17 に示すように、異なるステーションに分散している機能も同一の装置で行うことにより、個々の装置の稼働率を上げ、マテハン機能に必要な装置の総数を減らすことでコスト低減を図ることを目的としている。

図中 A1 と B1 は全く同じ機能であることから共通化可能で、さらにサイクルタイムの関係からまだ余裕がある場合、C1 のように若干機能が違ってても類似性の高

いものは装置のわずかな変更によりグループ化して同一の装置 e_1 で実行する。同様に A2 と C2 を装置 e_2 で、A3, B2, C3 が機能の類似性が高いので装置 e_3 にて実行する。

装置構成の理解を促すために、分かりやすい事例を図 18 に示す。設備間をまたいで機能を実行するという事は、装置そのものが設備間を移動して機能を果たすことになり、例えば移動機能のあるロボットのようなものがリーンオートメーションで使用する代表的なマテハン装置となる。

装置に必要な機能は必ずしもロボットだけではなく、簡単なローダや視覚装置などさまざまなケースが考えられる。リーンオートメーションのマテハンシステムにおいては、図 18 に示すような移動機能を持った装置だけで構成されるわけではなく、従来通りのマテハン装置も混在した形でコスト的に安価な目標値を達成しムダを省いたシステム構成となる。

この新しいコンセプトに基づく設計法が意味するところは、ライン全体で必要とされる全てのマテハン機能を、各マテハン装置に割り付けるラインバランシング問題として捉えてマテハン装置を設計することに他ならない。ラインバランシングは、機能要素の定義付けと、各機能要素間の先行関係を与えた上で、各種制約の下に個別の機能要素を個の装置もしくは人に配分する問題¹²⁸⁾、すなわち、ライン全体をシステムとして捉え、システム内に存在する手待ちのムダを削減する事によりコスト競争力を上げる事と言えるが、従来、ラインバランシング問題は、主機能に着目し、それに対応したステーション間のバランスとして考えられた。それに対し、本研究では、ライン全体で必要とされる付帯機能であるマテハン機能とそれを実行する装置の間のバランスに着目する。

前述したように手作業の場合、主機能であろうとマテハン機能であろうと人が行う作業としては同じであり、総作業時間だけが問題視され、ムダな時間の削減が考えられてきた。これに対し、従来の自動化システムでは主として主機能のバランスが考えられてきたが、その主機能が占めるコストの割合は前述したように 60%に過ぎない。残りの 40%を占めるマテハン機能に関するバランスと、そこから発生するムダは見過ごされてきた。しかし、遊び時間は当然ロスであり、リーン生産の視点から考えれば削減すべきムダである。このムダの削減は、オートメーション・ラインの投資コストの削減につながる。

このマテハンシステムは、主機能設備に対するマテハン機能提供のタイミングを決める。その結果、マテハンシステムが生産の流れを制御しサイクルタイムを決めることとなる。新しい概念によるマテハンシステムによるマテハン機能のリーン化の目的は設備コスト低減であることから、マテハンシステムの優劣を稼働率のみで評価するのではなく、サイクルタイムとマテハン装置の投資額の 2 つの視点で評価を行う。この時、稼働率はマテハン装置の代替え案を作成する場合のガイド指標として用いる。

2.6 リーンオートメーションに関する従来研究

オートメーション・ラインとリーンプロダクションを融合させた考え方はこれまでも研究事例があり，リーンオートメーションという言葉も各種論文内に存在する．それらの研究は大きく分けて次の2種類にまとめることが出来る．

- i) リーン生産方式の概念に基づき改善された手作業ラインを安価に自動化する研究^[29]
- ii) コラボレーションロボットのプログラムを人のリーンな動きから求める研究^[30]

i) の研究は自動化設計の方法というよりも，既存の手作業ラインを如何に安価に自動化可能か，という事に主眼が置かれている．作業者の作業分析を通じ，作業改善の積み上げによって作りこまれた手作業は，動きそのものにムダが無くリーンな状態であるといえる．動きがムダなく作りこまれているという事は，それを実現する自動化装置も安価に設計できる可能性が高い．図 19 に示すように，従来と同様の手作業改善により作りこまれたラインをベースに，安価な自動化を行う事をリーンオートメーションとして研究している^[29]．このアプローチの発展形には，「自動化装置にとって安価となるリーンな動き」という着眼がある．つまり自動化装置を安くするための動きそのものを考えて工程設計を行うという発想である．具体的には，自動化装置の作動軸数をいかに減らすかということがまずは挙げられるであろう．手作業は前述したように時間のみをパラメータとして改善を実施していく．作業時間を詰めていくプロセスの中で必然的にシンプルな動作に近づいていき，それは結果的には自動化装置に置き換えれば軸数が減っていく方向になるであろうが，それはあくまで結果論であるので，それをより科学的／解析的に明確化し，定量的な改善プロセスを見出すという研究の余地はある．これはまさに「動きのムダ取り」を主眼においた研究と言える．また，この研究

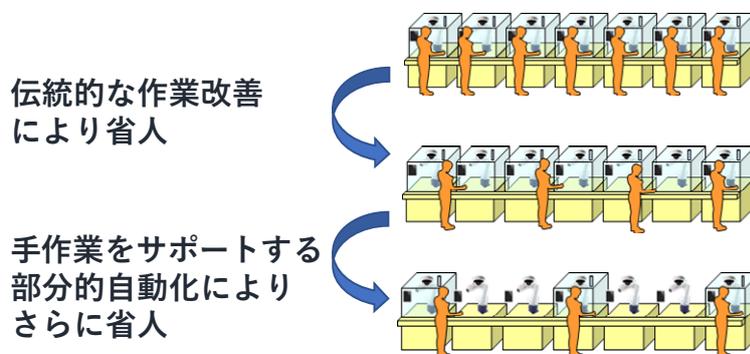


図 19 リーンオートメーションの従来研究^[29]

の発展形として、安価な装置という着眼で、カラクリを用いた自動化を対象とした研究も散見される^{[31][32]}。これらは実現する自動化装置を如何に安価に作るか、という視点での研究と言える。

ii) の研究は、人の器用さ、人が持つ暗黙知を参考にして機械に移植する研究である。コラボレーションロボットのように、自由度が非常に高い動きのプログラミングは解空間が非常に広いため、最適化のためには膨大な組合せ計算が必要になる。それに対して、人が持つノウハウに着眼して自動化を行えば、容易に良い解にたどり着く可能性を持っている。当研究は、フラウンフォーファー研究機構生産自動化研究所（IPA）が中心となり、プロジェクトして研究を進めた事例がある。近年、ロボットの進化は目覚ましいものがあるが、これからのロボットを使用する領域における高度な自動化という点で興味深い研究である。

これらの研究は、いずれもリーンの概念を自動化につなげてはいるが、いずれの研究も手作業がベースにあり、かつ、個別要素としての手作業の自動化置き換えであって、自動化そのもののリーンの在り方を論じているわけではない。本研究では、リーンプロダクションの概念をオートメーション・ラインに適用し、リーンのオートメーション・ラインの在り方そのものを体系だてて明確化する研究であり、そこに新規性がある。

2.7 リーンオートメーションシステム構築の課題

稼働率の高いリーンのマテハン装置を実現するには、従来、設備ごとにマテハン装置を設計していたものをシステム全体でマテハン装置の最適設計を行う。その時に、様々な機能組合せを実現するマテハン装置が求められることから、複合機能の装置が必要となり、従来の考え方と同様の設備づくりを行えば、個別の要求仕様に基づいて設計・構築されるカスタムメイドの設備となる。また、単体のマテハン機能を提供する装置に比べて、複数のマテハン機能を提供する複合機能のマテハン装置は、よりスピーディな動作が求められることと、複雑な機構に対する信頼性などを考慮してオーバースペックな設備仕様となることから、マテハン装置は高額なものとなる課題がある。加えて2.3で述べたように、オートメーション・ラインの設計では主機能装置を設定してから、それを成立させるマテハン装置を設計するという手順の中で、さまざまなマテハン装置の組合せが生じるが、最終的な評価はコストで実施する必要がある。これに対して、カスタムメイドのマテハン装置は、その装置の「都度見積もり」が必要な上に、見積もり値の信頼性を上げる為には詳細設計が必要となり、工程設計時のアイデアレベル段階ですべての案に対して装置構造詳細設計を行う事は現実的ではなく、それを容

易に検討可能な方法を構築する必要がある。また、その時に、マテハンシステムとして最も安価な装置が構成できる機能組合わせの探索方法が必要であるし、このマテハンシステムは、主機能設備に対するマテハン機能の提供タイミングを決めるため、それによりライン全体の生産の流れを制御しサイクルタイムを決めることから、サイクルタイムを考慮した形でコストの最適化を行う必要がある。以上をまとめると、リーンオートメーションを実現するマテハンシステム構築の課題は次の3つにまとめることができる。

- i) 工程設計段階でマテハン装置の都度詳細設計を必要としないコスト評価が可能な方法の確立
 - ii) マテハン装置の待機時間や機能のムダを省くことにより装置コストを削減し、目標を満足するマテハン機能の組み合わせとそれを実現する自動化装置の組合せ解を得る方法の確立（近似最適組み合わせ解の探索）
 - iii) マテハン機能を組み合わせる事によって発生する、機能間の時間的干渉を考慮し、コストとサイクルタイムから計算される製品1台当たりのコストの最適化を図る方法の確立（サイクルタイムとコストの近似最適化）
- 続いて、システム構築に解決が必要な前記3点について詳細を述べる。

i) 工程設計段階でマテハン装置の都度詳細設計を必要としないコスト評価が可能な方法の確立

マテハン機能のグルーピングを行った後に、それを実現する装置を専用で設計すると、装置は人工物であり創造されるものなので、それを実現する方法は無限に広がり容易に最適化はできない。その問題を解決し、工程設計レベルのアイデア段階で詳細見積もりを必要としないコスト評価を行うために、次の方策を用いてシステム構築を実現する。

① マテハン装置をレディメイドの機器ユニットを組み合わせる ETO (Engineer to order) 設備とする。

② マテハン機器を実装して動作させる汎用的なベース移動ユニットを準備する。

これらを実現するための課題は、本設計法に適したレディメイドの機器をあらかじめライブラリとして準備しておくことと、設計法の中でライブラリを有効に使用可能な方法を考案することである。

マテハン機能は、取り扱う（ハンドリングする）モノと、運搬する・保持する・位置決めするなどの目的思考の機能の内容・条件で定義・表現される。設計者は、この機能表現の要求仕様に基づき装置の構造を考える（創造する）ことができるが、既存の機器が個々の要求機能を実行するのに適しているかの判断は困難である。これらの要求機能に対して、3次元空間でのモノの移動のしかたに機能を記述すれば、装置との対応付を機械的に行う事ができるため、そのような記述方法を定義する必要がある。

ii) マテハン装置の手待ちや機能のムダを省くことにより装置コストを削減し、目標を満足するマテハン機能の組み合わせとそれを実現する自動化装置の割付

図 20 は本研究が目指しているマテハンシステムの姿を従来システムと比較して事例で示したものである。

設備は主機能を実行する主機能装置をメインに構成されている中で、主機能を支えるマテハン機能は、それを実現する装置で構成されるが、従来ラインは設備ごとに設置されるのに対して、新しいコンセプトはライン全体で構成される。例えば図 20 に示すように、従来ラインがコンベアとピックアンドプレース装置で構成されているのに対して、新しいラインは移動型双腕ロボットで構成される。従来システムは待機時間が多くムダが多いが、そのムダを削減するために導入した移動型双腕ロボットが従来システムのマテハン装置コストを総計したものよりも高価になれば、いくら時間的ムダを削減しても意味の無い事になる。この部分が手作業ラインとは最も大きく異なるところである。なお、図内に表されている記号や色は図 16, 17 と全く同じであるが、図の煩雑さを避けるため、主機能およびマテハン機能の記号名は省略してある。

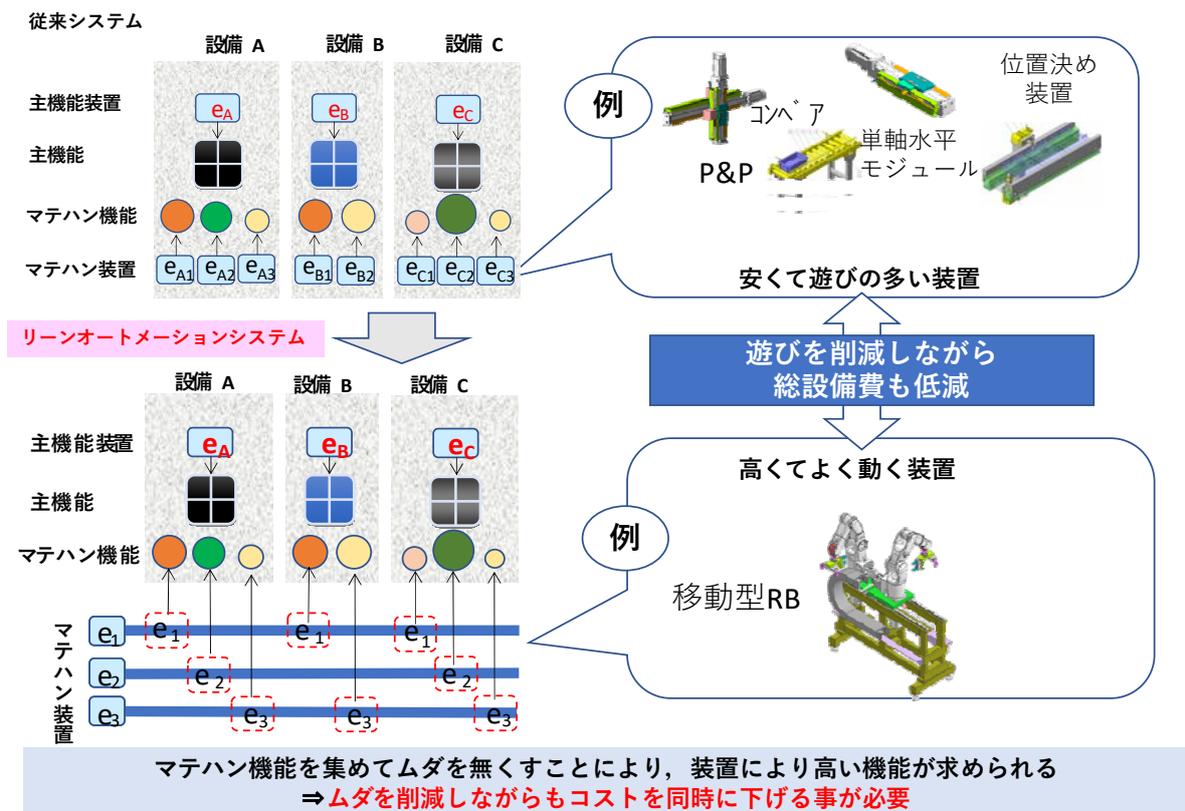


図 20 自動化装置のムダとコストの関係

手作業ラインの場合、2.2で述べたように、時間だけをパラメータにして作業の組み換えを行う。手作業は図21上段に示すように、基本的に人の間に機能の制約はなく、時間当たりの単価として同一とみなすことが出来るからである。一方これを自動化装置に当てはめた場合、何を基準に組み合わせを考えればよいか、という問題にあたる。自動化装置には機能に制約があると共に、各装置においてそれぞれのコストがあり、同じ時間だけ装置が遊んでいても、ムダにしているコストに差が出てくるため、コスト視点でのムダという点において一律に考えることはできない。

これらの問題を、自動化装置の機能とコストの関係で図に表せば、図21下段のようになる。改善前の各マテハン装置の機能を $F1, F2, F3$ 、それぞれのマテハン装置のコストを $C1, C2, C3$ とし、装置の待ち時間のムダを削減し、1つの装置に集約した場合の機能を F' 、コストを C' と置けば、それらを満足する条件は式(1)、(2)のように表すことができる。

$$F' \geq F1 \cup F2 \cup F3 \tag{1}$$

$$C' < C1 + C2 + C3 \tag{2}$$

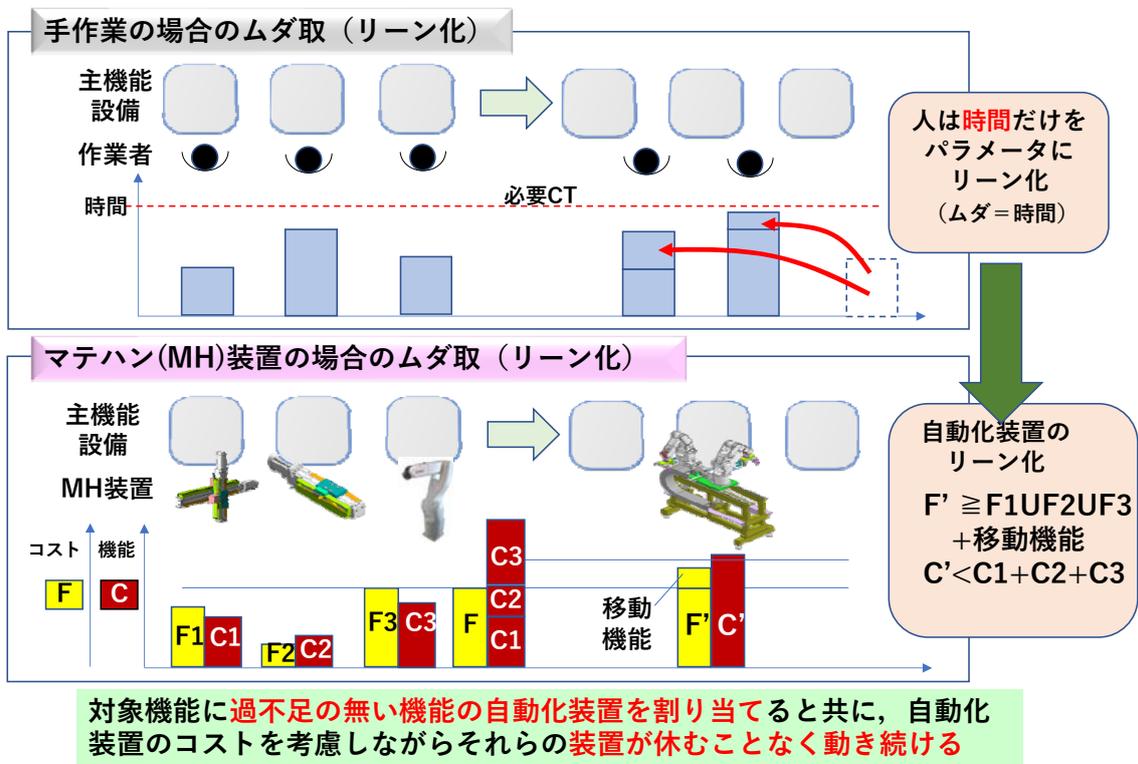


図 21 手作業ラインとオートメーション・ラインのリーン化の違い

必要機能をグルーピングした時に、その機能に必要な自動化装置は、もっとも高機能に合わせる必要があるため、その機能は集められた中にある低機能に対しては過剰という事になる。すなわち時間的なムダが削減できたとしても、機能としてのムダが増えるという事になる。

本研究テーマ設定の着眼点は、時間を基準とした動作のムダが出発点であるが、最終的に求める解はコストである。この時間のムダとコストの関係についてまとめる。

本研究で着眼した自動化装置の待機によるムダは、装置によってコストが様々である事から、同じ時間のムダがあっても、コストの観点でのムダの大きさは同一ではない。サイクルタイム内におけるマテハン装置の動きの中で稼働している時間と待機時間を層別し、稼働している時間と設備費を掛け合わせた値を「価値コスト(VP)」、待機しているムダな時間と設備コストを掛け合わせた値を「ムダコスト(LP)」と定義すれば図 22 のように表すことが出来る。図 22 において、縦軸はマテハン装置のコスト、横軸はサイクルタイムを表す。横軸にサイクルタイムをとった理由は、サイクルタイム内における装置のムダ時間を表現するためである。

このように表される図において、装置コスト×サイクルタイムで計算できる図中で赤枠に囲まれた面積の大きさを検討することが製品 1 台当たりのコストの検討とみなすことが出来る。なぜならば、製品 1 台当たりのコストは、装置コストを生産個数で割った値となるが、生産個数は稼働時間をサイクルタイムで割った値であり、稼働時間は定数であることから、装置コスト×サイクルタイムは製品 1 台あたりコストと比例関係にあるからである。

この装置コスト×サイクルタイムを「仮想製品 1 台当たりコスト」と名付け ICP と置けば、 $ICP = VP + LP$ と表される。ムダを削減するという事は LP を最小化

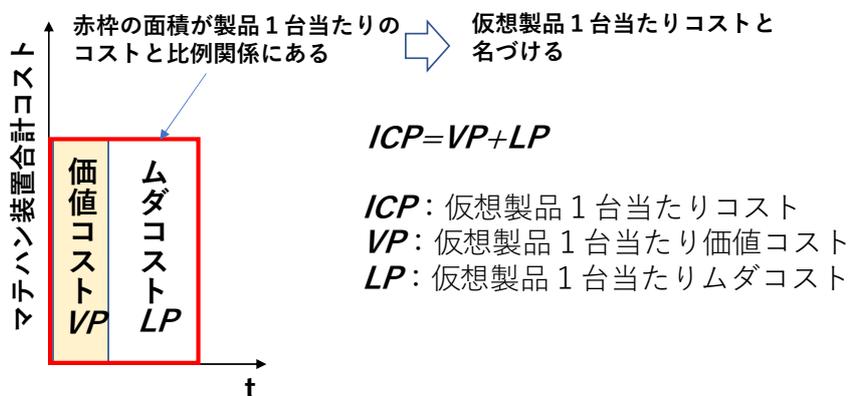


図 22 ムダコストの概念図

することにほかならないが，この時に同時に赤枠内の仮想製品 1 台あたりのコスト ICP も下がらなければならない．例えば図 23 のように，ムダコストは削減できても，その結果，装置コストが上昇し仮想製品 1 台あたりのコストが上昇したら全く意味をなさない．

本研究が提唱する新たなマテハン装置においては，マテハン機能をグループ化することによって待機時間のムダを減らしていくが，グループ化されたマテハン機能には，その機能にあう装置が都度割り当てられていくため，必ずしもムダコストの最小化が装置コストの最小化にはならない．そのため，両者を考慮しながら解を見出す方策を確立する必要がある，それが第 2 の課題である．

iii) サイクルタイムとコストを考慮した最適化

本コンセプトに基づくマテハン装置は，設備間を行き来しながらマテハン機能を果たすために，従来独立で機能を果たしていた状態と比べれば，マテハン機能実行時に時間的な相互干渉が発生し，その干渉によりサイクルタイムに影響を与える現象が発生する．図 24 はその事例を簡単に図に表してある．

ライン全体でマテハン装置の設計を行うためには，主機能を含めた設備間の干渉を考慮に入れる必要がある．時間的遊びである待機時間を削減し，ムダのない動きの自動化装置を導入しコストも大きく下げることが出来たとしても，結果として，サイクルタイムが伸びてしまえば，製品 1 台当たりのコストという見方をすれば，コストアップを招く可能性も十分にある．したがって，待機時間のムダを削減するための機能の組み合わせ時において，サイクルタイムを満足する制約を満たさなければならない．本コンセプトに基づくマテハン装置の構成は，設備

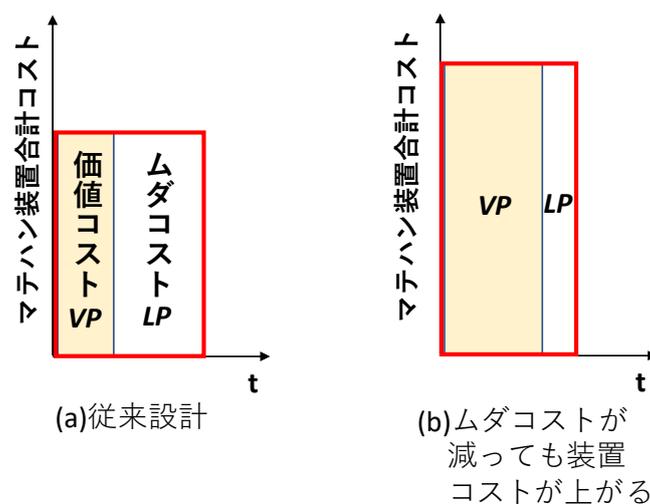


図 23 ムダコストが下がってもマテハン装置コストが下がらない事例

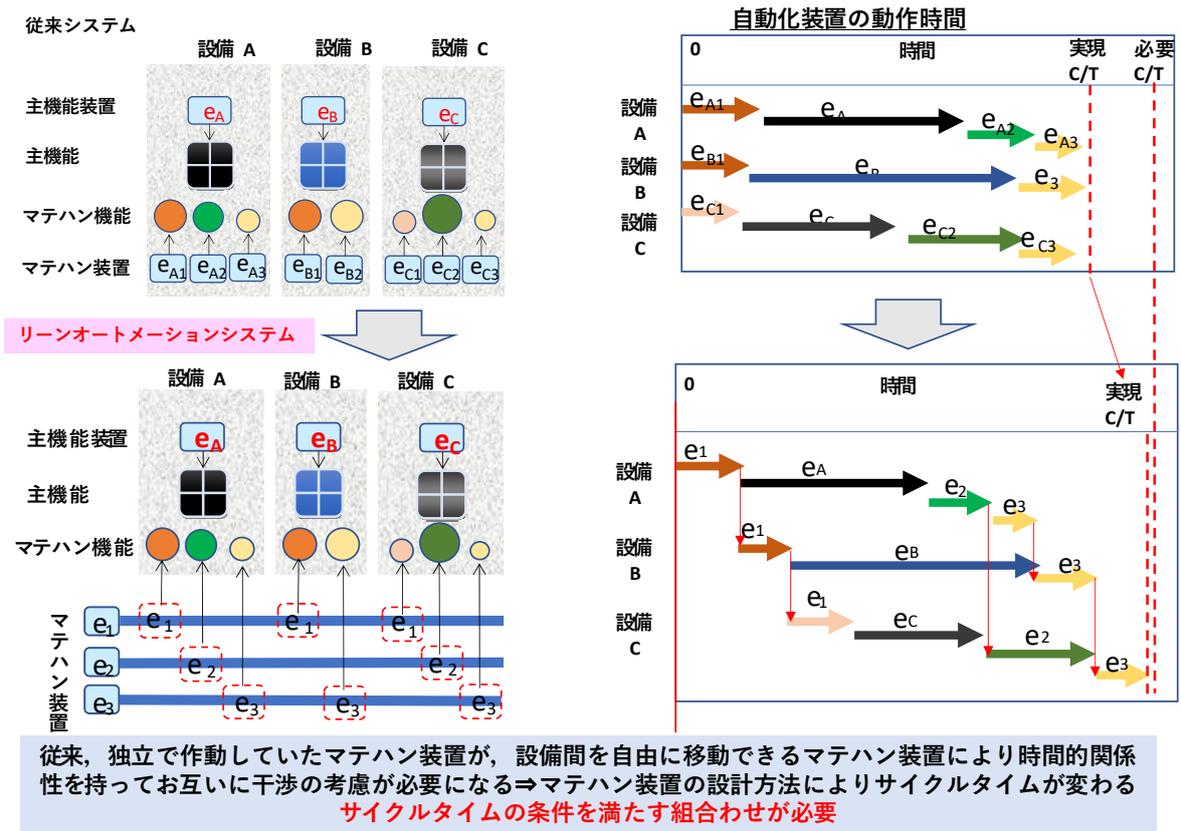


図 24 リーンオートメーションシステムにおけるサイクルタイムの問題

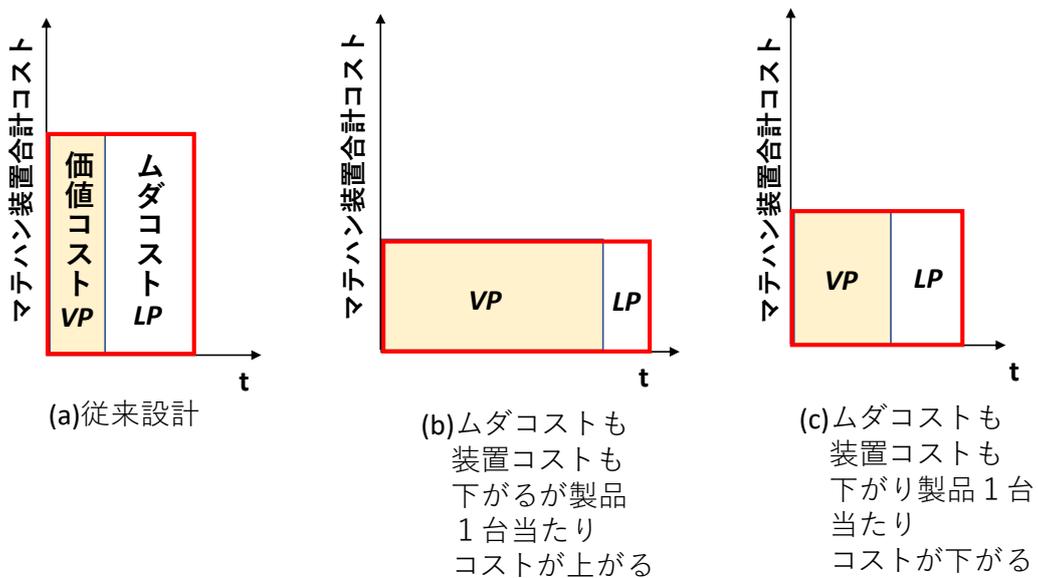


図 25 リーンオートメーション自動機における装置コストとサイクルタイムの関係

間を自由に行き来するため、装置構成上は機能順序に制約はなく自由に順序を組むことが可能である。一方で機能の先行関係というものが存在し、その先行関係という制約を守りながら、サイクルタイムが設計要求を満たす機能順序を見つけ出し、サイクルタイムを計算しながら機能の組み合わせの良し悪しを判断しなければならない。そのような解を探索する方法はこれまでに研究された事は無く、新たな方法を考案する必要がある。

この課題もii)と同様の表現法を用いて図25に事例で示す。機能のグルーピングにより設備費が下がっても、それによりサイクルタイムが伸びれば、それにより生産可能な数量が減るために、結果的に製品1台当たりのコストが上がる可能性がある。図25はムダを削減する過程において、コストとサイクルタイムの関係が変化していく具体的事例であるが、図の中の(a)はムダが大きい従来設計での製品1台あたりのマテハン装置コストの状態を示す。これに対し図中(b)は設備費が下がりムダコストが下がったとしても、マテハン機能のグルーピングにより、機能を実行する時間の干渉によって結果的にサイクルタイムが伸びて製品1台当たりのコストが上がってしまうパターンを示す。そもそもの目的であるコスト低減の視点で考えれば本末転倒である。マテハンのムダに着眼し、それぞれのマテハン機能の組み合わせとそれを実現する装置の選択には様々な選択肢が生じるが、求める姿は(c)で示すようにムダコストを下げる中で、トータルとして製品1台当たりのコストを削減する事である。

2.8 リーンオートメーションシステムの設計方針

本研究が求める設計法の方針を図26に示す。マテハン装置コストとサイクルタイムで囲まれた仮想製品1台当たりコストであるこの面積を最小化していくわけであるが、この中でVPを極力安い方法で達成することを考案すると同時に、LPそのものを小さくしていく事により、製品1台当たりのコストを下げていく。それを実現するためには、マテハンの各機能までさかのぼり、コストが安価となる効率的な機能グループ案を作成し、その機能グループ案を実行する自動化装置を選択する。すなわち、本設計法が求めるものは、製品1台当たりのコストが設計許容値を満足する安価なコストを達成するように、マテハン機能のグループと各グループの機能を実行する自動化装置を決定する事である。なお、これまでムダコストと全体コストの関係を説明するために仮想製品1台当たりコストICPで説明してきたが、実際の解法におけるコスト計算においては、真の1台当たりコストCPを用いて計算する。

したがって、目的関数は製品1台当たりのコストCPの最小化であり、式(3)で表される。

$$CP = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{T/CT} \quad (3)$$

ただし

n : グループ化された機能に割り当てられたマテハン装置台数

x_i : i 番目のグループ化機能のマテハン装置コスト

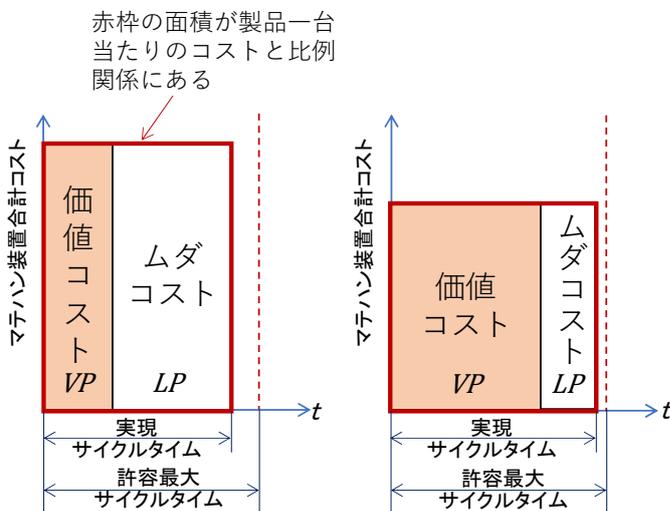
T : 設定稼働時間

CT : サイクルタイム.

製品 1 台当たりのコストを求める為には装置のコスト X_i とサイクルタイム値 CT が必要となる. これらの値はマテハン機能グループのつくり方とそれに割りてマテハン装置により都度変化する. マテハン機能の組み合わせに基づく装置の割り当てによって, 適切な機能の実行順序や装置間の干渉状態が変わるためである. したがって, グループ化された機能にマテハン装置を割り当て, 設備費を明

設計方針

製品1台当たりコスト CP が最小になるように, マテハン機能のグループと各グループの機能を実行するマテハン装置を決定する.



$$ICP = VP + LP$$

$$CP = (VP + LP) / T$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i M_i}{T/CT} + \frac{\sum_{i=1}^n (1 - \eta_i) M_i}{T/CT} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{T/CT} \end{aligned}$$

- ICP : 仮想製品 1 台当たりコスト
- CP : 製品 1 台当たりコスト
- VP : 仮想製品 1 台当たり価値コスト
- LP : 仮想製品 1 台当たりムダコスト
- M_i : 機能グループ i に割り当てられたマテハン装置コスト
- η_i : 機能グループ i に割り当てられたマテハン装置の負荷率
- i : グループ番号
- n : グループ数
- CT : サイクルタイム
- T : 負荷時間 (固定)

図 26 リーンオートメーションの設計方針

確化すると同時に、その時々機能順序を考慮したサイクルタイム値を算出し製品1台当たりコストCPを評価し最小値を求めることとなる。

この時、サイクルタイムが都度変化していくことに対する考え方を明確にしておく必要がある。サイクルタイムは一般的には生産条件によって一義的に決められるものと考えがちであるが、生産量と稼働時間によって求められる数字であることを考えれば、オペレーション方法や製品生産量の振れなどを考慮して、戦略的に決められる数字であり、ある程度の許容幅が存在する。したがって、本研究においては、許容最大サイクルタイムを生産の条件から設定し、その限度内で最適値を探索する事とする。考え方をまとめたものを図27に示す。

リーンオートメーションシステムを構築する課題をまとめると、以下の通りである。従来設計が主機能を基準とした設備ごとのマテハン設計を行っていたのに対して、本研究が提唱するリーンオートメーションシステムにおいては、システム全体を捉え、マテハン装置のムダを排除し、製品1台当たりのトータルコストとして設計要求値を満足する安価なマテハン装置設計を行う。その時の課題は、レディメイドのマテハン装置を組み合わせてシステムを構築するための、組み合わせが容易に可能なマテハン機能の記述方法の定義を定め、その定義に基づくマテハン装置の選択法を確立すること、そして待機時間のムダ削減とそれにとまなう

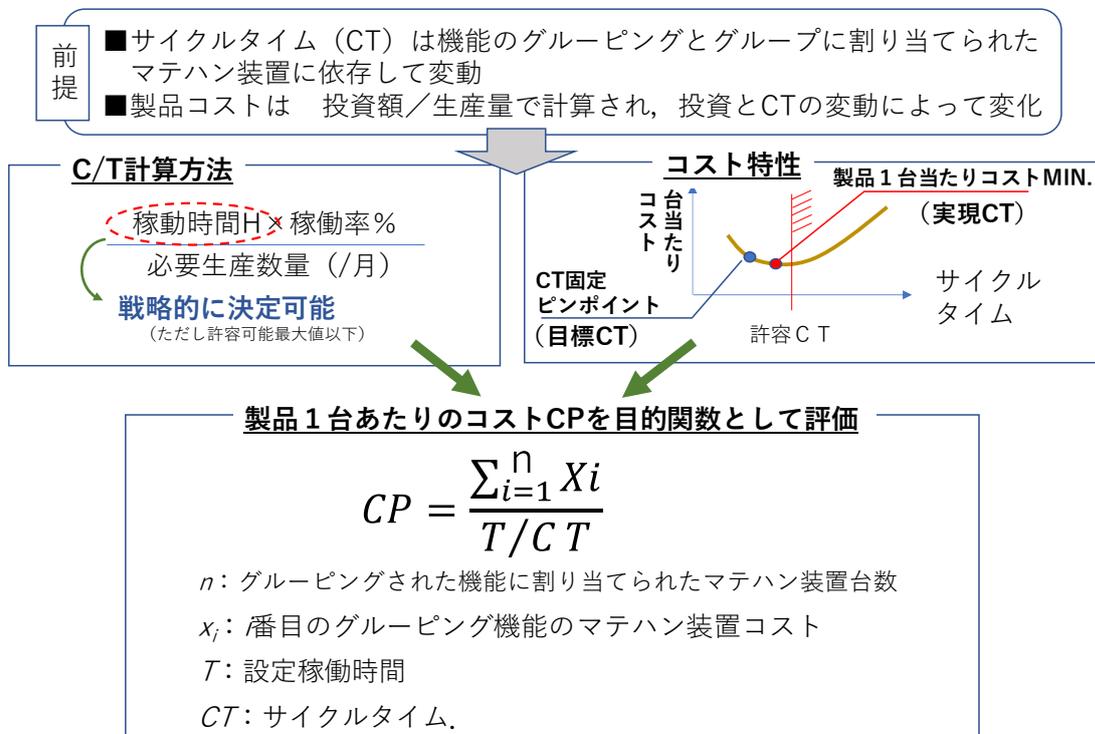


図27 評価関数とサイクルタイムの考え方

装置機能変化の両面より，コスト低減が可能なマテハン機能の組み合わせ探索を行う方法を確立すると共に，その時に機能順序を決定しサイクルタイムを算出し製品 1 台当たりのコストを計算する手法を確立する事である．

3. 対象物の移動に着目したマテハン機能とマテハン装置の関係表現

3.1 マテハン機能の属性分類による機能属性表作成

本研究が目指すマテハンシステム設計法は、マテハンのムダを削減しコストダウンを図るために、機能の類似性の高いマテハン機能をグルーピング化し、そのグループに対し極力安価な装置を割り当ててシステムを構成する事となる。2.7で述べたように、設計者は要求される機能に対して既存の装置が個々の要求機能を実行するのに適しているかの判断は困難である。機能と装置の対応付を機械的に行う事が可能な機能の記述方法を定義する必要がある、そのためにはマテハン機能の記述に対して、各マテハン機能の分析が必要となる。それを行うために、マテハン機能に対して機能属性の定義付けを行った。マテハンとは、主機能間のモノの移動であり、そこには「モノ」と「移動」を定義する必要がある。モノの定義の必要性は、ラインの中で扱う部品が多種類あるとともに、基準となる製品そのものにおいてもラインの中で製品の形が変わっていくので、その形に応じたマテハン装置が必要になるからである。その属性はモノそのものの特徴に他ならない。移動の方については、装置としての機能に落とせば動作となる。これらの「モノ」と「移動」について図 28 に示すような複数の属性項目で分類を行った。対象物の属性については、大きさ、重さ、形、物性の 4 項目、移動の属性については、方向、速度、密度、距離、経路の 5 項目である。

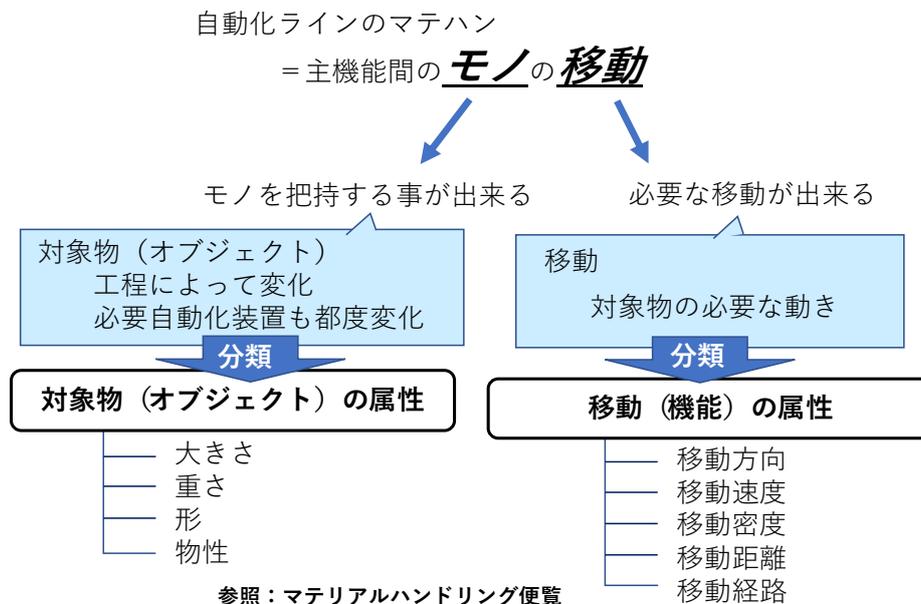


図 28 マテハン機能の組合わせ検討のための属性項目

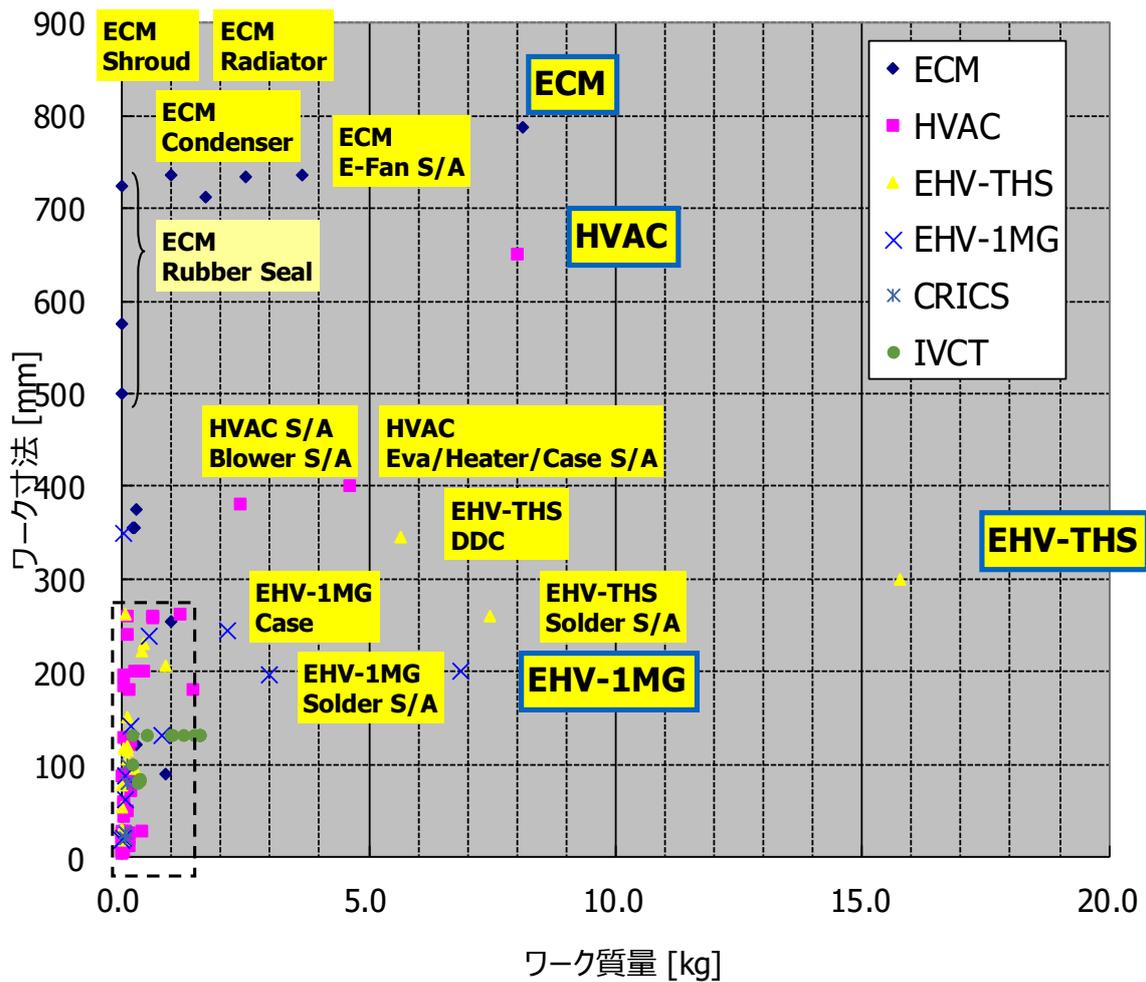


図 29 (株) デンソーの製品分析

この分類に基づき、具体的なマテハン機能の属性付を行った。装置の基本特性を決定づける基本特性として大きさと重さをまず設定し、それらについては、(株)デンソーで扱う製品群を大きさと重さで分類を行い、実際に準備可能なマテハン装置の機能をベースにそれぞれ大きさについては3つに、重さについては4つに分類することによって属性値を決定した。図29は最も大きな製品から小物まで代表的な製品とそれに使用する全部品の重量と大きさの分布を示したものである。自動車部品という特性より、殆どのものは重量1kgf以下、大きさ300mm以下という小物となっているが、一方では10kgf、1000mmに近いものも存在する。

分類の考え方としては、これらの製品特性分析をベースに、分類された結果として出現頻度が均等になるように分類値を決定したいが、一方でそれを扱うマテハン装置の仕様として、その分類と全く一致しない状態では分類の意味がない。したがって、本設計にて使用するマテハン装置の実力値をベースに分析を実施する。分析としては、重量は装置の可搬能力に依存するので、それを基準にした分類を考えるが、ワークの大きさはエンドエフェクタに依存し、一般的には装置と

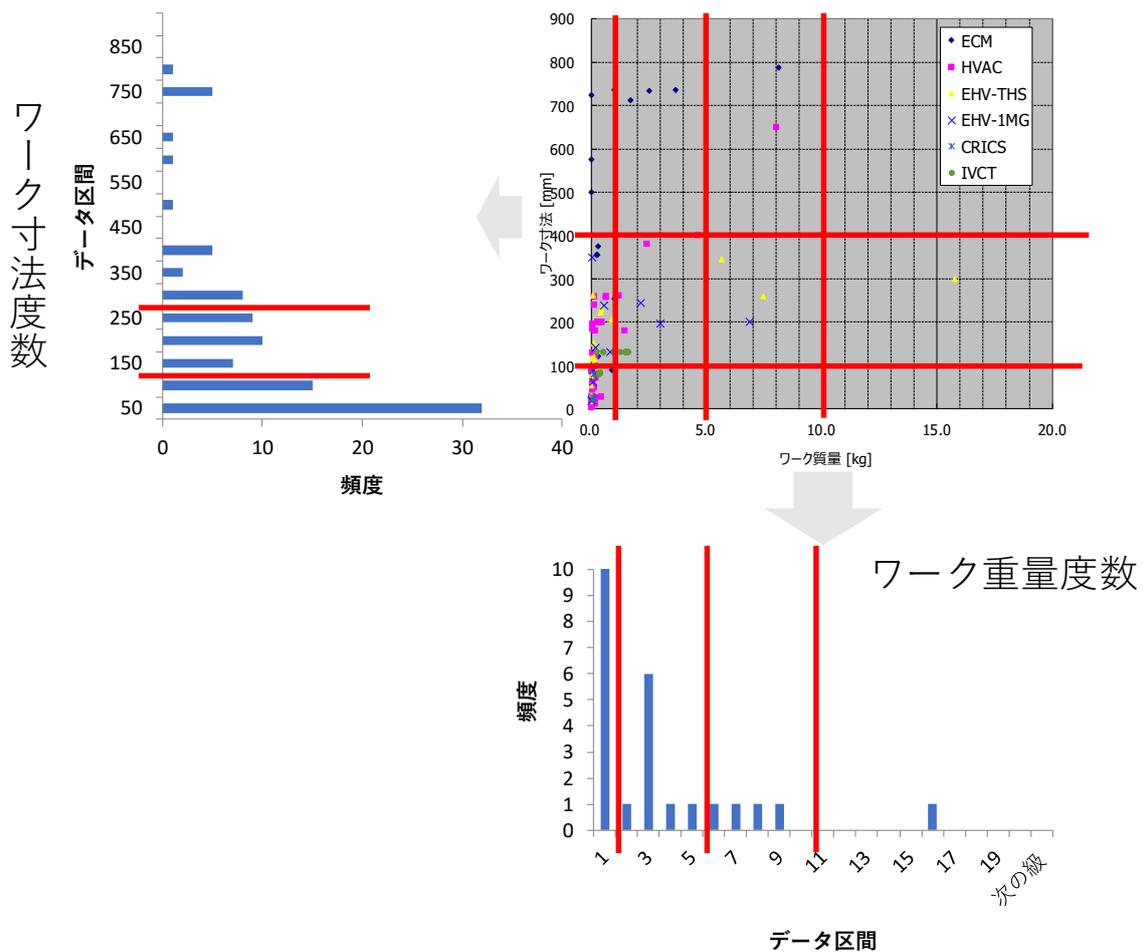


図 30 大きさ、重さの属性分類分析

は関連性がない。したがって重量におけるマテハン装置の能力で極力均等に分類を行い、ワークサイズについては、単純に製品・部品そのものの出現頻度により均等に分ける。その概要を図 30 に示す。結果としては大きさの属性値を 3 つ、重さの属性値を 4 つにした。なお、マテハン装置の可搬重量分析については、図 35 に示してある。

小物領域の製品/部品が圧倒的に多い事より、その大きさをより細かくカバーできるよう、大きさを基準にして投影最大辺 100mm 以下を小物に、250mm 以上を大物に、その中間のものを中物という形で 3 段階に定義付けするとともに、重さに関しては、マテハン装置能力分析に基づいて出現頻度の均等性を考慮し、超軽量物を 1kgf 以下、軽量物を 5kgf 以下、中量物を 10kgf 以下、10kgf 以上を重量物の 4 段階での定義とした。

大きさ、重さ以外の形や物性項目については、装置目線でみれば基本的にエンドエフェクタの問題である。これらについては組立性評価法での分類^[33]やマテハン工学でまとめられている分類^[34]を参考にし、(株)デンソーの製品群の中で代表的な 10 製品の部品 90 点について、その属性を分析し (表 3)、最終的に図 31

に示す属性項目を決定した。

次に移動の属性について述べる。従来のマテハン設計においては、そのほとんどにおいて対象となる製品／部品の属性をベースに、サイクルタイムを基準にして、あらかじめ設定されたマップから一義的に装置を選択していた。図 32 にコンベアを選ぶ場合の従来事例について示す。

従来の設計法は、サイクルタイムとモノの大きさ基準でマップから機械的に選択していたものに対して、本設計法においては、マテハン機能をグルーピングす

表 3 (株)デンソー製品/部品の属性分析

部品	形					物性		
	平物	箱物	丸物	長物	異形物	剛体	低剛体	柔軟物
shaft				○		○		
oriffce			○			○		
spring					○	○		
plate	○					○		
copper				○			○	
bodyvalve			○			○		
yoke			○			○		
housing					○	○		
b-plate	○					○		
bolt				○		○		
magnet					○	○		
terminal					○	○	○	
coil	○					○		
cap	○						○	
bearing			○			○		
o-ring					○			○

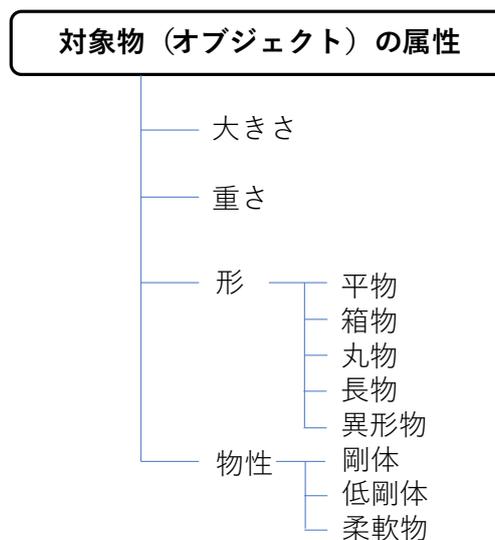


図 31 対象物の属性分類結果

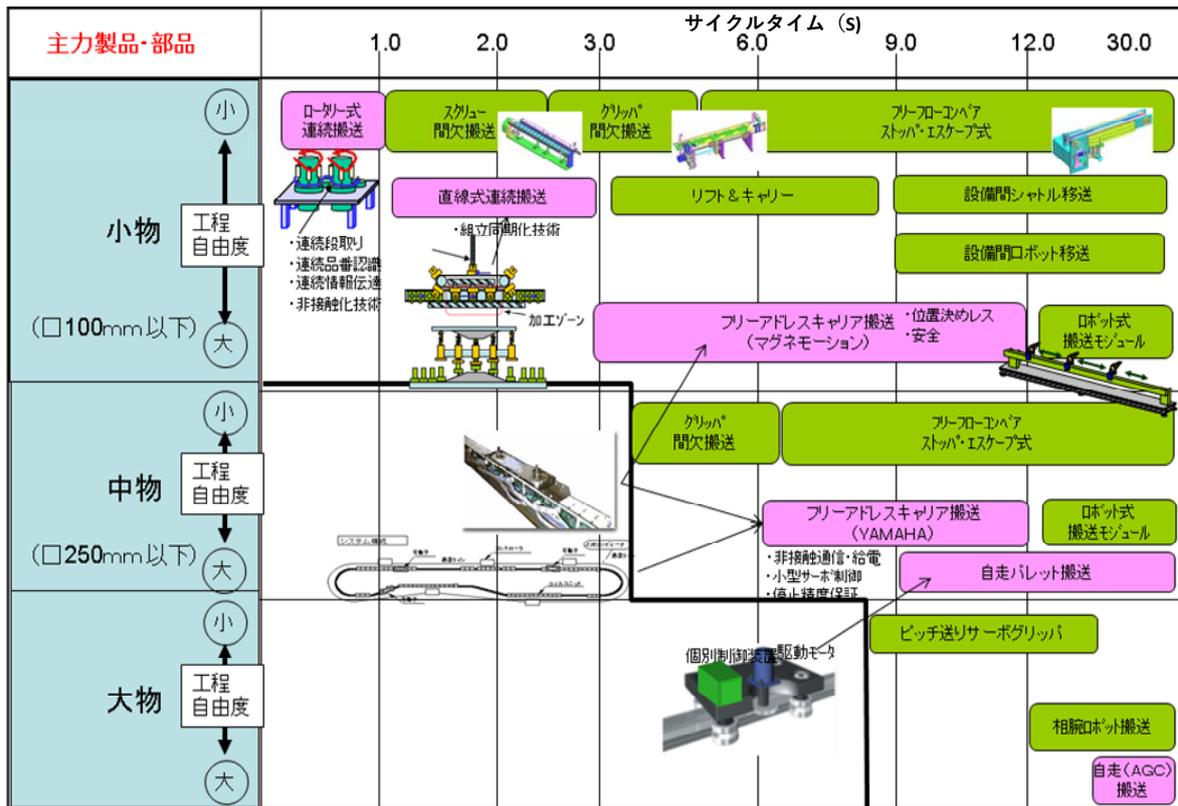


図 32 コンベア選択に用いたマップ (従来事例)

るための移動の属性として、各装置が持つ「動き」を共通項目として整理する必要がある。対象としているマテハン機能の移動の属性を演繹的に決定しようとした場合、マテハン機能が対象とする主機能の空間的配置と、その間の移動における制約を明確化する必要がある。一方で、現実的なステップとしては定義付けられた動きが自由に選べるわけではなく、現実的に選択可能な自動化装置の属性に制約を受ける。したがって、移動の属性を明確化する方法としては、実際に使用可能なマテハン装置の機能分析を行うと共に、ラインとして実際に必要となる属性分析の突き合わせにより具体的属性値を決定する事とした。その項目は、図 33 に示す通りである。

現ライン分析の概要について述べる。図 34 は 2.4.2 でも事例で取り上げた自動車用エンジン ECU 組立ラインの先頭工程のマテハン機能を示したものである。この事例では先頭工程にて基板の検査を行うが、製品の取り出し、移載、反転等、各個別機能をまず分解する。分解された機能を、搬送、位置決め、認識などの汎用的機能でまとめる。これらを対象工程すべてに実施し、必要な汎用機能を抽出した後に、それぞれまとめられた汎用機能に対して、必要な移動を方向、速度、密度、距離、経路の 5 項目で分類し、記述できない項目が無いかを確認し、それらを属性としてまとめる。

一方、制約条件である既存自動化装置からの選択、という点において、選択可能な全 41 自動化装置を、同じく前記 5 項目で分類を行い、それらの項目で過不足

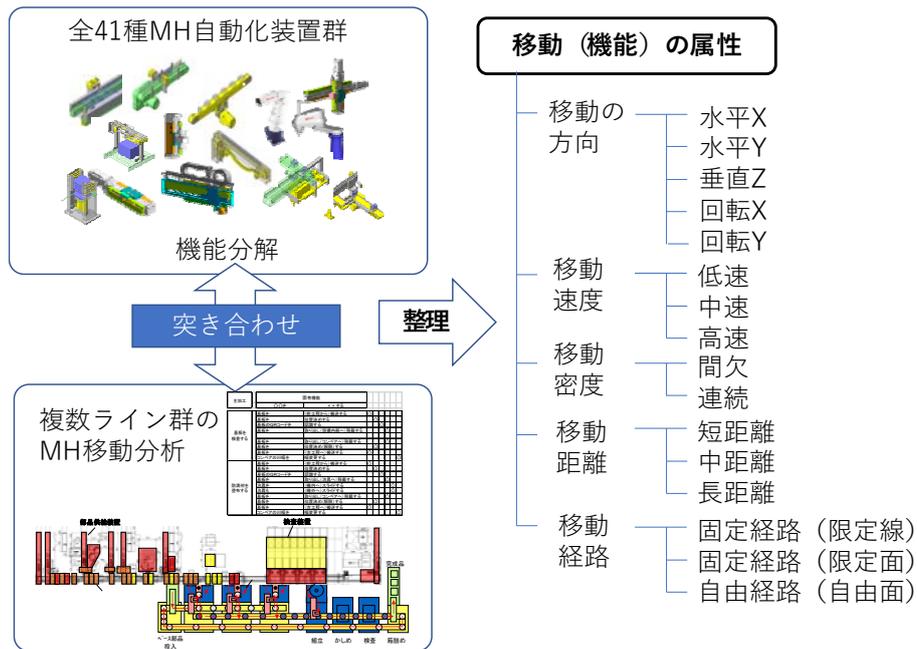
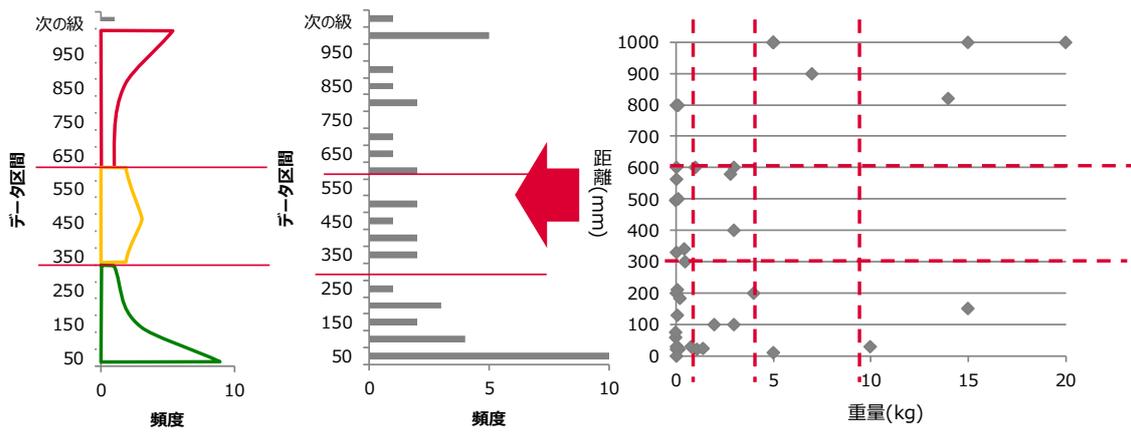


図 33 移動の属性

が無いかを確認する。この時、距離や速度などの具体的な数値の設定においては、分類数を増やして計算を煩雑にすることを避けるために、極力少ない分類を心掛けた。可搬距離の事例を図 35 に示す。可搬重量と可搬距離については、マテハン装置特性として一般的には独立して選択はできず相関関係がある。簡単に言えば重いものをハンドリングできる装置は必要剛性よりサイズが大きくなり、その結果として可搬距離も大きくなる、という事になる。その特性を考慮の上、装置仕様として可搬重量と可搬距離の分割された出現頻度をより均等になるように、区切りのよいところとして決定をした。また、分類数については、装置の費用との相関を取り、コストの違いが比較的大きくなる場所を選び設定した。具体的には、速度においては、400mm/s、4000mm/s を境とした 3 分類、距離については、300mm、600mm を境とした 3 分類とした。これら属性項目のまとめと、装置の移動分析の突き合わせにより、最終的に図 36 に示す属性項目にまとめた。



可搬距離の度数分布

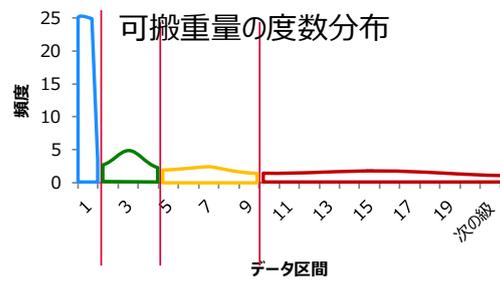
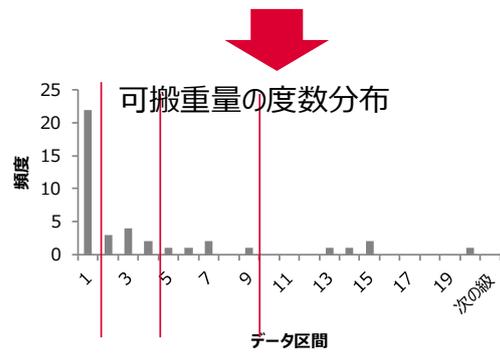


図 35 搬送距離分類のための分析事例

マテハン装置群

1	ロボット搬送装置モジュール C-001	18	ロボット搬送装置モジュール A-004	32	固定経路ロボット B-006
2	ロボット搬送装置モジュール C-002	19	搬送方向制御モジュール B-007	33	自由経路ロボット B-005
3	ロボット搬送装置モジュール C-003	20	KYフィーダーモジュール D-001	34	自由経路ロボット B-006
4	搬送装置モジュール A-001	21	KYフィーダーモジュール D-002	35	自由経路ロボット (3軸構成) D-001
5	搬送装置モジュール A-002	22	KYフィーダーモジュール D-003	36	自由経路ロボット D-002
6	搬送装置モジュール A-003	23	KYフィーダーモジュール D-004	37	自由経路ロボット (2軸) H型構成 D-003
7	平ベルトコンベヤモジュール B-001	24	平ベルトコンベヤモジュール D-004	38	自由経路ロボット (6軸) V型構成 D-004
8	平ベルトコンベヤモジュール B-002	25	平ベルトコンベヤモジュール D-005	39	自由経路ロボット (6軸) V型構成 D-005
9	平ベルトコンベヤモジュール B-003	26	固定経路ロボット B-003	40	自由経路ロボット (7軸) D型構成 D-001
10	平ベルトコンベヤモジュール B-004	27	固定経路ロボット B-001	41	自由経路ロボット (7軸) D型構成 B-001
11	平ベルトコンベヤモジュール B-005	28	固定経路ロボット B-004		
12	平ベルトコンベヤモジュール B-009	29	固定経路ロボット B-002		
13	ベルトコンベヤモジュール E-001	30	固定経路ロボット E-003		
14	ベルトコンベヤモジュール E-002	31	固定経路ロボット E-004		
15	ベルトコンベヤモジュール E-005				
16	ロボット搬送装置モジュール C-006				
17	搬送装置モジュール A-002				

移動属性分類

移動の方向		搬送速度	搬送密度	搬送距離	搬送経路
水平 X (奥行方向)	水平 Y (垂直方向)	高速 ≥ 4000 mm/s	連続	低距離 < 3000 mm	自由経路 (自由面移動)
垂直 Z	回転 X	中速 < 4000 mm/s	間欠	中距離 < 6000 mm	固定経路 (限定面移動)
回転 Y	回転 Z	低速 < 4000 mm/s	滞留	長距離 ≥ 6000 mm	固定経路 (限定線移動)
屈曲					

各装置毎に移動分解

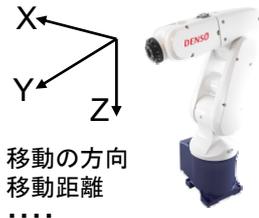
図 36 自動化装置の移動属性分類

3.2 マテハン機能属性に基づき必要装置が選択可能なライブラリ作成

マテハン機能の属性を基にマテハン機能の組み合わせを考えた後に、そのグループの機能に合致しつつ最も低コストな装置を設計する必要がある。2.7 で述べたように、さまざまな組合せの機能のコストを探索していく時に、機能属性を満足するマテハン装置をカスタムメイドで都度設計しては、現実的ではない。それを容易に実施するために、マテハン装置のライブラリを準備し、この中から要求する機能属性を満足する装置を選択可能とする。ライブラリの中に収納する装置は、例えばロボットをはじめとした市販のマテハン装置から、従来は専用機にて設計した専用機能群の装置の中で、汎用性の高いものについては、標準化装置として収納する。収納される装置は、過去使用してきた装置を調査し、機能の重なり具合とコストを評価した上で、基本は同じ機能の装置については最安値装置を収納する。装置と要求機能の関連付けを容易にするために、ライブラリは、各マテハン装置の機能を 3.1 で述べた機能属性と同じ分類でまとめると共に、各装置のコストデータを持つことにより、必要機能グループに合致する装置を容易に選択できるようにした。その具体的な内容を図 37 に示す。

このマテハン装置ライブラリは、対象とする製品や生産の状態によって変わる。今回作成したライブラリは (株) デンソーにおける製品を対象としたものである。

自動化装置



機能属性表と全く同じ項目の属性にて
自動化装置の機能を表現
(容易に作業から装置を割り当てるため)
(各装置のコストデータ付き)

	対象物の属性											移動の属性																						
	サイズ		重量		形状			物性				移動の方向			搬送速度		搬送密度		搬送距離		搬送経路													
	小物 <100mm	中物 <250mm	大物 ≥250mm	超軽量物 <1kg	軽量物 <5kg	中量物 <10kg	重量物 ≥10kg	丸物	箱物	平物	異形物	剛体	低剛性	柔軟物	水平X (奥行方向)	水平Y (垂直)	回転Z	回転X	回転Y	屈曲	高速 ≥4000mm/s	中速 4000mm/s	低速 400mm/s	連続	間欠	滞留	低距離 300mm	中距離 600mm	長距離 ≥600mm	固定経路 (限定線移動)	自由経路 (自由面移動)			
各種自動化装置 (コスト付)	フル		○	○	○			○	○	○			○																					
	基本モジュール		○	○	○			○	○	○			○																					

図 37 マテハン装置ライブラリ

(株)デンソーで扱う製品は手のひらサイズから両手で抱えられる程度の大きさの製品、そして生産量としては数千台/月～数十万台/月をカバーできる。したがって、一般的に人が扱う工業製品に対しては組立、加工に限らず広範囲に適用可能であると考えられる。一方、例えば車のような大きなもの、あるいは生産数量が全く異なる装置産業のようなものには適用できず、その場合は、各製造分野や製造方式によってそれぞれ作成する必要がある。その場合においても、本章にて述べた同様の方法を用いれば作成可能である。図 38-1、図 38-2 に (株)デンソーで使うライブラリを事例として示す。機密保持の観点より、各装置のコストは省略してある。

本章では、対象とするマテハン機能に対して、ムダの無いマテハン装置を設計するにあたり、必要な作業となる各マテハン機能のグルーピングを行うために、マテハン機能の属性項目と属性値を決定した。マテハン機能の属性を表現するために、対象物の属性と移動の属性に分け、各項目を対象製品と使用可能なマテハン装置の機能分析を通じて、共通属性表を作成した。この属性表を使用して、マテハン装置のライブラリを作成した。

マテハン機能の属性表とマテハン装置ライブラリを考案する事により、各マテハン機能間の類似性判断を可能とし、それらのマテハン機能に必要なマテハン装置を自動的に選択可能とした。

	対象物の属性											移動の属性																													
	サイズ		重量		形状			物性				移動の方向		搬送速度	搬送密度	搬送距離	搬送経路																								
	小物 <100mm	中物 100~250mm	大物 250~1000mm	超軽量物 <5kg	軽量物 5~10kg	中量物 10~100kg	重量物 ≥100kg	丸物	箱物	平物	長物	異形物	剛体	低剛性	柔軟物	水平X (開口方向)	水平Y (奥行方向)	垂直Z	回転X	回転Y	回転Z	屈曲	高速 ≥4000mm/s	中速 1000~4000mm/s	低速 100~1000mm/s	連続	間欠	滞留	低距離 100~300mm	中距離 300~600mm	長距離 ≥600mm	固定経路 (限定線移動)	自由経路 (自由面移動)								
1軸	パレット位置決めモジュール C-001		○	○	○	○			○	○	○	○	○												○	○	○	○	○	○	○	○	○								
	ベルトコンベア用位置決めモジュール C-002		○	○	○	○			○	○	○	○	○												○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
	ワークセンタリングモジュール C-003		○	○	○	○			○	○	○	○	○												○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○						
	単軸垂直モジュール A-001		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					
	単軸水平有限モジュール A-002		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
	単軸水平無限 (リニア) モジュール A-003		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
	平ベルトコンベアモジュール B-001		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
	ブラチェーンコンベアモジュール B-002		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	丸ベルトコンベアモジュール B-003		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	ワークピッチ送りコンベアモジュール B-004		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	コンベア幅可変モジュール B-008		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	ワークサイズ段替えコンベアモジュール B-009		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	ショートストロークチャックモジュール F-001		○	○	○	○			○	○	○	○	○													○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	ロングストロークチャックモジュール F-002		○	○	○	○			○	○	○	○	○													○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	トレイ搬送ストッパモジュール C-005		○	○	○	○			○	○	○	○	○												○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
パレット片寄せモジュール C-006		○	○	○	○			○	○	○	○	○												○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
昇降エレベーターモジュール H-002		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
平面 (2軸)	ピック&プレース A-004		○	○	○	○			○	○	○	○			○	△								○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	門型ピック&プレース A-005		○	○	○	○			○	○	○	○			○	△									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	搬送方向屈曲モジュール B-007		○	○	○	○			○	○	○	○	○											○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	X Y テーブルモジュール D-001		○	○	○	○			○	○	○	○	○			○									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

図 38-1 (株) デンソーのマテハン装置ライブラリ事例

4. リーンオートメーションを実現するマテハンシステム設計法の開発

4.1 リーンオートメーション設計法の全体像と設計手順

2章で述べたリーンオートメーションを実現するマテハン装置を構築するための設計手順を図39に示す。まず工程設計における基本的条件は所与である。ここで言う基本的条件とは、生産量や稼働時間などを代表とする生産に関する必要条件、製品の付加価値を決定する主機能の種類と工程順序、それに関する必要条件（ロット数や加工時間など）、さらにはその主機能を実現する設備の基本構成などである。それらの所与の基本条件を出発点として、まず工程順序に沿って基本設備の構成を決める。それにより主機能の順序と空間的配置が決定される。その設備の基本構成をベースに、必要な全マテハン機能を抽出する。抽出された全マテハン機能を、機能の類似性に基づきグルーピングを行う。最初に類似性に基づきグルーピングを行う理由は、ムダコストの概念から考えれば、サイクルタイムの中で極力動き続ける状態を作り出すと共に、装置コストを抑え込むためには、極

機能グループ数 ϵ^* を変化させながら以下の計算を実行する。その際、基本工程条件は所与とする。

- ・主機能の工程順序
- ・主機能の工程情報（許容CT, 製品姿勢など）
- ・主機能装置の基本構成

*機能グループ数は、 $1 \leq \epsilon \leq \text{全機能数}$ 但しグルーピングした機能実行時間 \leq 許容CT

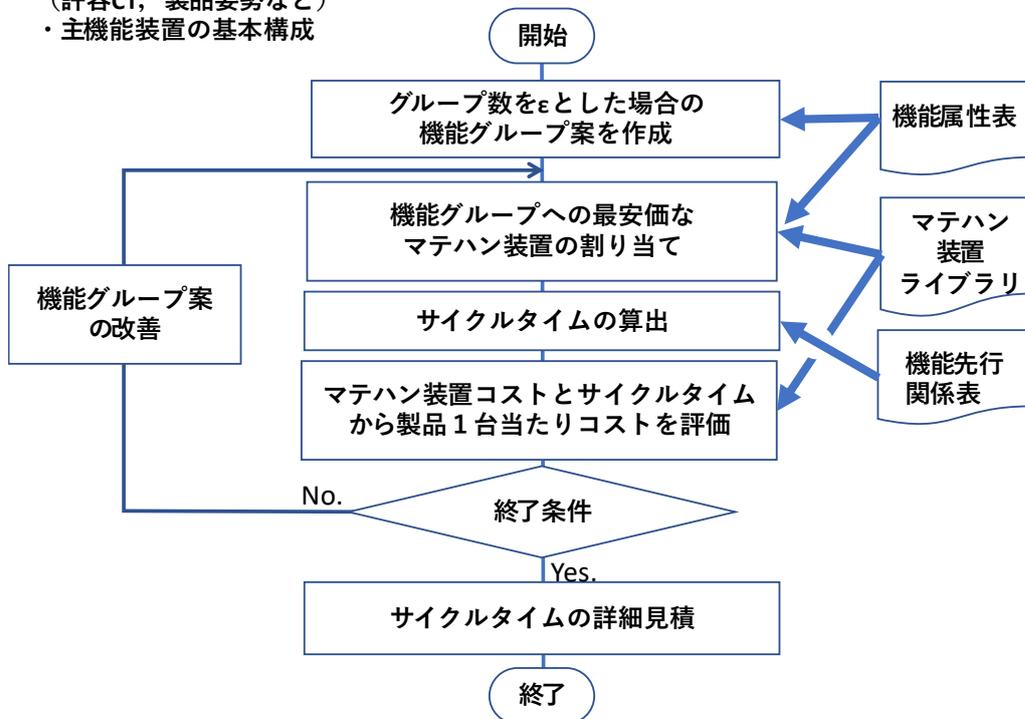


図39 リーンオートメーション設計法の全体像

力過不足ない機能を備えた装置を選ぶ必要があり，そのためにはグルーピングされるマテハン機能は基本的に近い機能を集めるべきであるからである．グルーピングには，3章にて作成した機能の属性表を用いて，その属性の類似性を基にクラスタ分析を行う．

ただし，それぞれの機能の重みやコストへの影響，あるいは今回の場合マテハン装置が設備間を移動する事になるが，それによる空間配置の影響，機能順序によるサイクルタイムの影響，等々，考慮しなければいけないパラメータは多数ある．これらのトレードオフの関係は非常に多くの組み合わせが考えられ，全数探索を行うことは難しいため，メタヒューリスティクス解法を用いることで近似最適解を導き出し解決する．近似最適解の導出にあたっては，クラスタ分析にて導き出された機能の類似性によるグルーピングされた組み合わせを初期解として，遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて各制約を満たすような製品 1 台あたりのコストが最小となる近似最適解を求める．コストの算出においては，グルーピングされたマテハン機能群に必要な属性に対して，マテハン装置の実施可能な機能を照らし合わせて機能を満足する最安値のマテハン装置をライブラリから選択した上で，該当マテハン装置の総コストと機能順序を考慮して導出されるサイクルタイムをベースに製品 1 台当たりのコストを計算する．コスト算出に使用するサイクルタイムは，計算の効率性を考慮し簡易計算によるものなので，GA による最良解が求められたのちに，タブーサーチ (TS) を用いて機能順序の改良により，精緻なサイクルタイムを再計算し最終解を得る．

次節以降にて，遺伝的アルゴリズムを用いた計算方法，タブーサーチによる最終解の算出方法について述べる．

4.2 遺伝的アルゴリズムを用いたマテハン機能のグルーピングと装置の割り当て方法

マテハン機能のグループ化とそれに割り当てるマテハン装置の組み合わせは膨大な数が存在し，効率的な解法を確立しないと実用的な設計法とはならない．そこで遺伝的アルゴリズム (以下 GA) を用いて解の探索を行う．

GA は生物の進化過程を模擬する進化的アルゴリズムの 1 つであり，John Henry Holland によって提唱された^[35]．非線形な特性を示す多数のパラメータの最適化を目指す手法であり，OR の領域や本設計法のようなシステム設計の分野への適用例も多い^{[36][37]}．本設計における GA の基本項目について順に述べる．

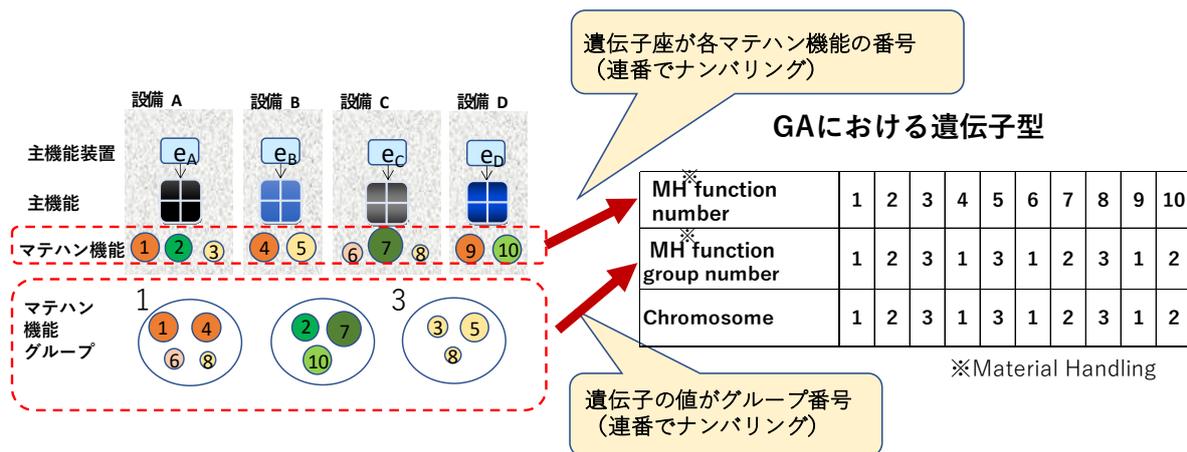


図 40 遺伝子設計

i) 染色体の表現

採用した遺伝子型を図 40 に示す。遺伝子座がマテハン機能番号，遺伝子の値がグループ番号を示している。なお，マテハン機能のグループ化においては，グループ数をいくつにするかは重要な点である。グループ数も含めて 1 度に最適化を図ると探索範囲が大きくなり，最適解に至る途中の経緯が見えない。本研究では，グループ数を変化させながら，それぞれについて GA を実行するものとする。指定するグループ数は，最大を全機能数，最少をどのグループにおいても所定のサイクルタイムの上限を超えない範囲とする。

ii) 適応度

適応度として，製品 1 台あたりの設備コストを計算する。具体的には，染色体で表現された機能グループごとに，グループ内の機能を実行できる最小コストのマテハン装置を割り当てることで，装置の総コストを求め，それらの装置で機能を実行した場合のサイクルタイムを求める。サイクルタイムは，機能の先行関係図を作成し，Helgson と Birnie (H&B) の位置的重み付け法を使って計算する^[38]。位置的重み付け法では，機能の先行関係の中で，後に続く機能に必要な実行時間の総和を重みとして，重みの大きい順に機能の実行順を割り付けていく。

本手法によるサイクルタイムの見積もりは概算であり，また，機能の重み付けに基づいて実行順序を逐次選択していく事から，おおよその良い解として簡易的に求めることが可能である反面，必ずしも最適化された実行順序とはならない。一方，後述するような方法で最適な機能実行順序を求めることでサイクルタイムを最小化するためには，かなりの計算時間を要し，GA の適応度計算の中で行うことは計算時間の観点より現実的ではない。したがって，GA を用いて機能グループとそれを実行するマテハン装置を求める段階では，位置的重み付け法によって概算したサイクルタイムを用いる。その後，次項に示すタブーサーチを用いた，

より適切な機能実行順序の探索により，サイクルタイムの精緻な値を求めることとした。

以上より，適応度は，製品 1 台当たりのコスト CP として，2.8 の式(3)にて示した通り下式より求める。

$$CP = \frac{\sum_{i=1}^n Xi}{T/CT} \quad (3)$$

ただし，

n : グルーピングされた機能に割り当てられたマテハン装置台数，

x_i : i 番目のグルーピング機能のマテハン装置コスト，

T : 設定稼働時間，

CT : サイクルタイム。

iii) 交叉

交叉では親とした個体の特性を遺伝して保持した新生の個体を作り出す。これによって親の特性をある程度引き継ぎつつも，異なる解を模索する事が可能となる。本設計手法では全個体を対象とした 1 点交叉を用いる。最初は全個体を対象として，また 2 回目以降ならばまだ交叉をしていない個体を対象として，2 つの個体を取り出し，遺伝子上のランダムな 1 点交叉を行い，できた 2 つの新生の個体と，親となった 2 個体の計 4 個体を次世代に向けての予備プールへ格納する。これを，交叉していない個体が無くなるまで繰り返す。結果として予備プールには，そのまま移動された親の個体と新生の個体がすべて存在し，既定の倍の個体数になる。

iv) 突然変異

突然変異は，自然界でもあるように新生の個体に，親の持つ特性以外の遺伝子が発現することである。これによって，局所最適のような，個体群の中の遺伝子の中に似たような組み合わせが多くなり，新たな解が探索されにくいような状況が打開できる。

本設計手法では，突然変異は 2 種類を実施する。1 つは交叉後の新生の個体に対して行う突然変異で，事前に定めた突然変異率で発生させる。次ページに続く 4.3.1 で詳細を述べるが，本設計手法ではクラスタ分析の結果をグルーピング案として GA の初期解に採用しており，このバラツキを抑えるために親の個体の全てを予備群に残す交叉を利用しているので，その副作用として解の多様性が失われる可能性がある。このため高めの突然変異率を採用して多様性を増やすよう配慮する。前述したように本設計法では親の個体が全て予備群として残るため，高い突然変異率でも収束性に問題は発生しにくい。突然変異が発生する事になった個

体は、遺伝子の中の 1 か所が、現在探索中の機能グループ数内のランダムな数値になるものとする。例えば 13 グループで探索中の場合は 1 から 13 の中からランダムな数字となる。

もう 1 つの突然変異は、すべての個体が同一となった場合に、新生の個体全てに突然変異が起きる事とする。起こす変異自体は遺伝子の中の 1 か所がランダムになるものだが、新生個体の全てに適用する。突然変異率は個体群の多様性を尺度として決定すべきという研究も多くされており¹³⁹⁾、この突然変異は多様性が失われた場合の保険として作用する。

v) 次世代集団の生成

選択は進化の過程で、環境によって次世代へ生き残る個体が選択される過程を模倣している。処理上は次世代へ残す個体を、定めた評価関数に基づくルールで選択する。本設計法ではエリート選択とランダム選択を組み合わせた。交叉と突然変異を経た予備プールのうち、適応度上位 1/4 をエリートとして次世代へ引き継ぐ。予備プールは、定めた個体数の倍存在するため、上位 1/4 の選択は、次世代の個体数の半数を選択することになる。これに対して残りの半分は予備プール全体の中からランダムに選択する^{140) 141)}。図 41 は次世代生成の具体的な方法を事例を用いて示している。

今回の場合、遺伝子型の表現の関係で、特定のマテハン機能グルーピングパターンが、異なるマテハン機能グループ番号でも表現できてしまう。図 42 にその事例を示すが、例えば、マテハン機能 A、B、C がグループ 1, 2, 1 の場合、グループ 2, 1, 2 と表現しても同じグルーピングとなる。そのため、同じグルーピングをしていても違うグループ番号で記している個体同士の交叉は、交叉前の個体の特徴を引き継ぐことができない。それにより交叉や突然変異による遺伝子の組み換えによって、個体の良好な性質が損なわれる確率が高くなるため、探索の効率が悪くなる。このために次世代の予備群の全体から上位を活かす事とした。

vi) 解の終了条件

事前に設定した最大世代数まで繰り返し、最終的に「現世代」の中で最も適応度の高い個体を解とする。本設計法は実用化に耐えうるものを目指している。実用化に耐えうるとは、企業における工程設計業務の中での仕事のスピードに追従できる計算時間であるのが条件である。今回の目標としては、一般的な PC 性能（CPU Corei7-U6500 2.5GHz RAM 8GB）において、数十工程を持つ規模のラインを対象として数日程度で解を得られることを目標とする。

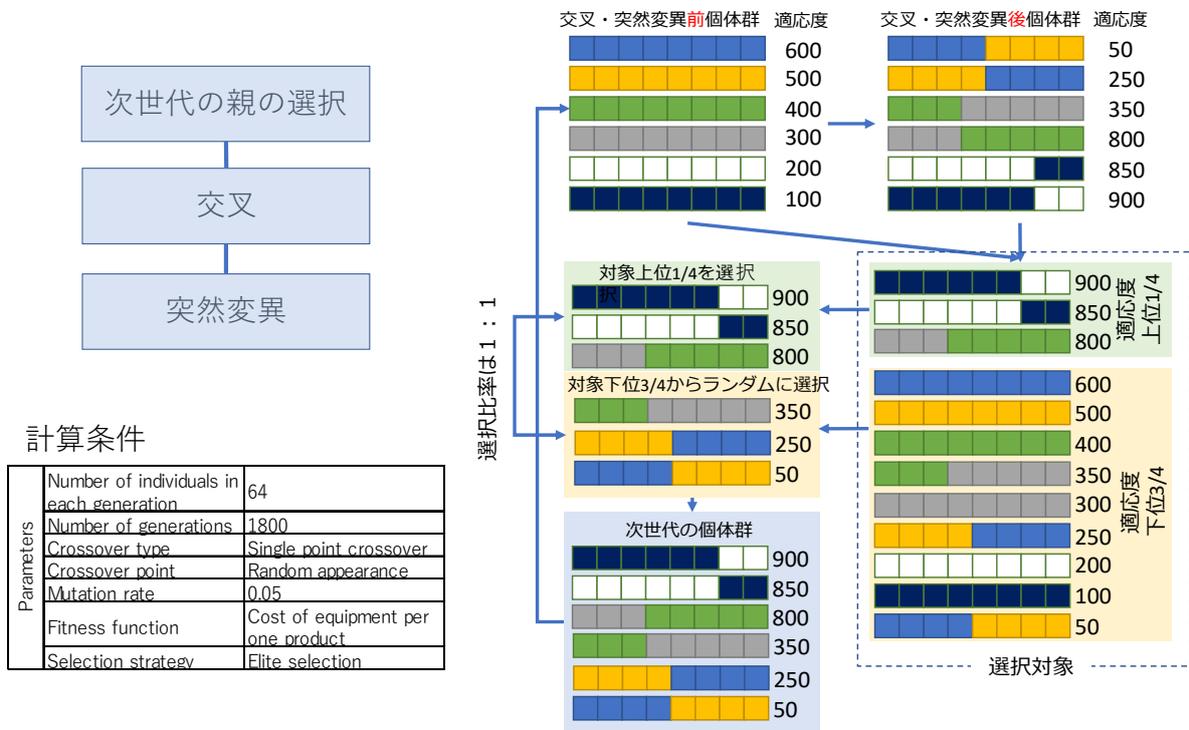
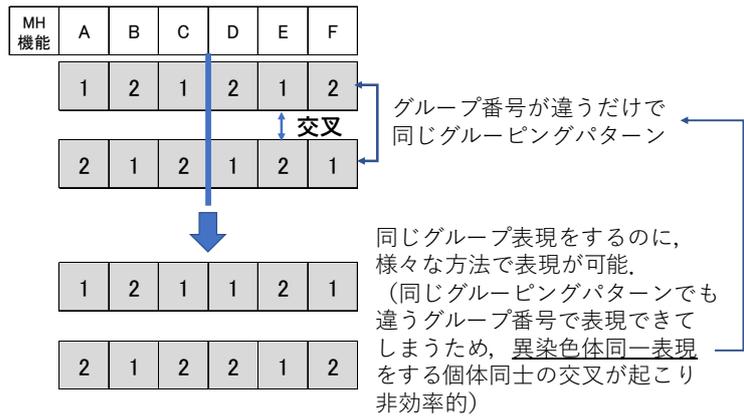


図 41 次世代集団の生成

同一の表現を複数のパターンで示せる



- ・探索の効率が悪い
- ・交叉前の個体の特報を引き継げない交叉が起こる

図 42 遺伝子表現による課題

4.3 初期解生成とサイクルタイム見積もりのアルゴリズム詳細設計

4.3.1 初期解生成のアルゴリズム

GA における初期集団は、理屈上ランダムに選んでもある一定レベルの解にはたどり着けるが、本計算手法の確立においては、実用的な解法を目指しているため、収束の速い初期解を生成する事が肝要である。

一方、2.3 で述べた通り、リーンオートメーションの概念である「サイクルタイムの中で極力動き続ける状態を作り出すと共に、装置コストを抑え込む」ことを実現するためには、極力過不足ない機能を備えた装置を選ぶ必要があり、そのためにはグルーピングされるマテハン機能は基本的に近い機能を集めるところをスタート地点とし、それをクラスタリング分析手法を用いて実施する。

初期グループ生成のためのクラスタリング分析においては、3 章で定義した機能の属性値を用い、類似性により機能のグループ化をする。この時、いくつのグループに分類するか、という事が大きな問題となるが、最適なグループ数の探索を含めて一気に計算する事も不可能ではないが、組み合わせ数増加による計算の複雑さの問題、そして、各グループ数における最適解の変化の傾向の見える化という点で、最終的な探索解まで一気にたどり着いてしまう事によって実作業としての中身の考察の難しさがあるといった問題が挙げられる。これらの課題を解決するために、本設計法においては、計算開始時に、まずグループ数を指定し、その指定したグループ数における解の探索を実施する。そして指定グループ数を変えながら、それぞれのグループ数の最適解を導き出した後に、その中から最も良い解を最終解とする、というステップを取る。図 43 はその概念図である。

なお、指定するグループ数は、全機能数以下、機能の合計時間が所定サイクルタイム以下となるグループ数以上、という範囲で設定する。

クラスタリングの方法としては、k-means 法を用いる^[42]。図 44 に示すように、機能属性値を用いてクラスタ分析により初期集団を生成する。属性値は表 4 に示すように、属性表で決めた各項目に対して、1-0 の範囲で定量化し、属性ベクトル間の 2 乗ユークリッド距離で評価を行う。

この時、グループ数を指定して当該グループ数におけるマテハン機能の組み合わせを探索し、その分析は初期に指定されたグループ数ごとに実施する。クラスタ分析で得られた結果を遺伝子型で表した個体をのうち、50%の遺伝子はそのまま残し、残りの 50%の遺伝子はランダムに組み替えることで、GA の初期解として用いる 1 世代分の個体を生成する。

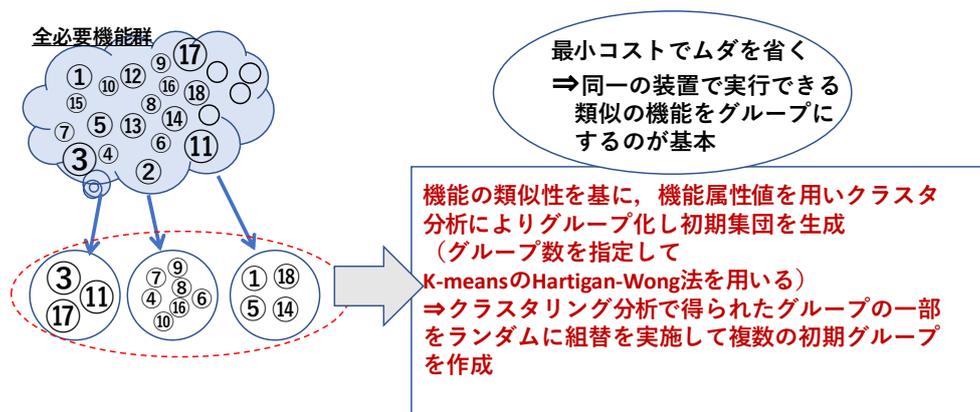


図 44 初期集団生成法

4.3.2 マテハン機能グループ案評価に必要なサイクルタイムを計算するためのアルゴリズム

製品 1 台あたりのコストを算出するために、マテハン機能の組み合わせグループごとにサイクルタイムを算出する。算出のためには機能の実行順序を決める必要があるが、そのためには機能の先行関係が必要となる。通常先行関係は工程の制約によって決定されるが、ほとんどの場合それは主機能しか論じない。今回の場合マテハン機能まで拡張した先行関係が必要な上に、マテハン機能に割り当てられた装置は、機能の順序とは関係なく機能の類似性やコスト視点で役割を割り付けられているので、先行関係に新たな制約が生じる。したがって、本設計法に適用できる新たな先行関係図の作成法を考案する必要がある。図 45 に示す事例にて、新しい先行関係図作成法考案のポイントについて述べる。

図中左上は従来構造のオートメーション・ラインを表す。2 つの設備で構成されており、それぞれ機能としては主機能 A、主機能 B となっている。それらの機能を実現する装置を e_A 、 e_B で表してある。工程順序としては $e_A \Rightarrow e_B$ となっており、通常の先行関係図においては、この 2 つしか書かれていないのが一般的である。これにマテハン機能を追加すれば、主機能の順序に合わせて、図 45 右中央に書かれているような順番になる。一般的には、このような先行関係図は分岐合流が存在する手作業工程における最適工程順序決定に有効であるが、オートメーション・ラインのようにほぼ一直線で流れる工程に対してはあまり重視されない傾向にある。加えて、マテハン機能は主機能に従属している状態では、ほとんど検討する必要が無い。

今回の場合、システム全体でマテハン機能を最適化し、かつ、主機能と切り離された状態でシステムを成立させる事を考えれば、主機能が機能を果たしている

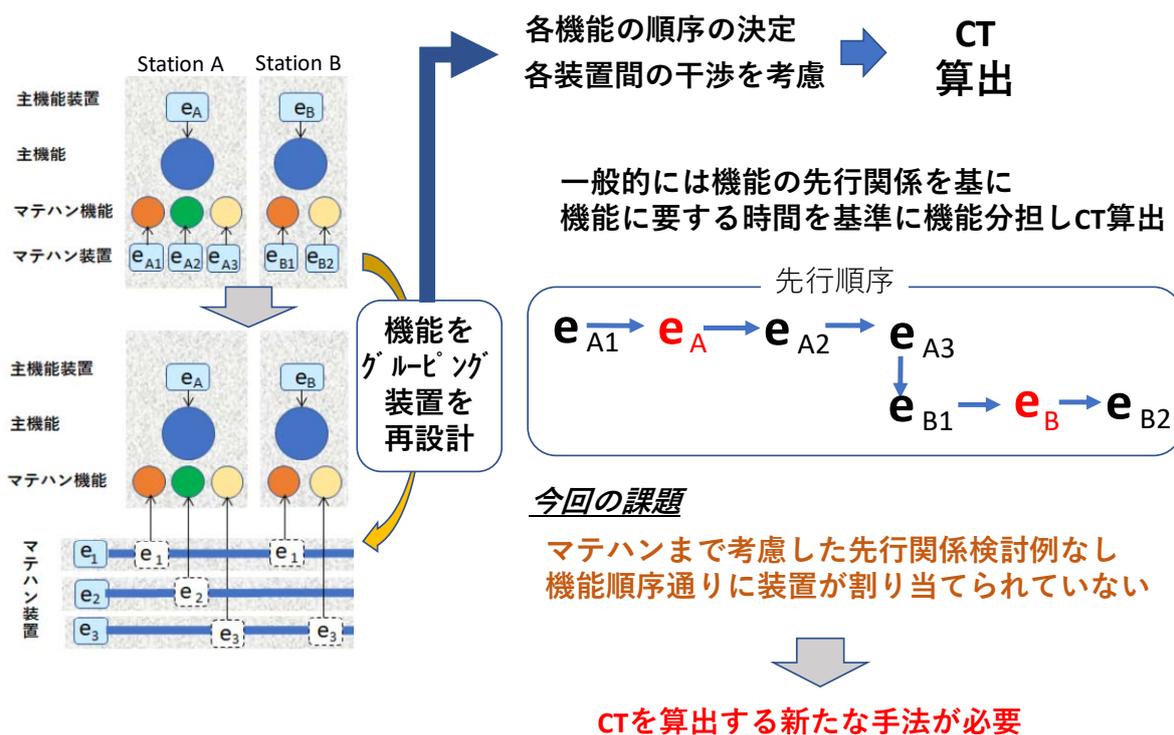


図 45 新たな先行関係図考案の必要性

間に、マテハン機能がその機能を果たせばよく、順序に対しては相当自由度がある。その順序は主機能の順序と、システム内に存在する仕掛品の位置と数によって制約を受けることとなる。その制約に沿ってマテハン機能の順序を決定し、その順序における機能を果たす時間と各機能との干渉を考慮した上でサイクルタイムを計算する必要がある。

したがって、新たな先行関係図の作成にあたっては、従来の先行関係図と比べて、3つの視点での拡張を行う。

- i) マテハン機能まで拡張した先行関係図づくり
- ii) 同時並行的に機能が進む関係を考慮
- iii) マテハン装置の割り当てを考慮

以下順に説明する。

i) マテハン機能まで拡張した先行関係図づくり

通常の先行関係図は主機能の関係しか論じない。手作業の場合、主機能に付随するマテハン機能は主機能で制約を受ける先行関係の順序通りに実施されていき、その連続性の中で機能を考えるためにわざわざマテハンにまで分解しなくても主機能だけ考えておけば十分に事足りるからである。本システムの場合、マテハン機能順通りに装置が動くわけではないので、1つ1つのマテハン機能の先行関係が装置の実行順序を決める大きな制約となる。したがって、まずはすべてのマテ

拡張①：マテハン機能を考慮

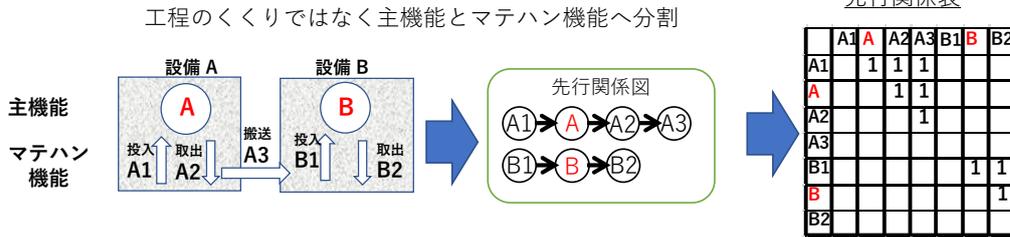


図 46 先行関係図のマテハン機能までの拡張

拡張②：同時並行的に進む機能の関係を考慮

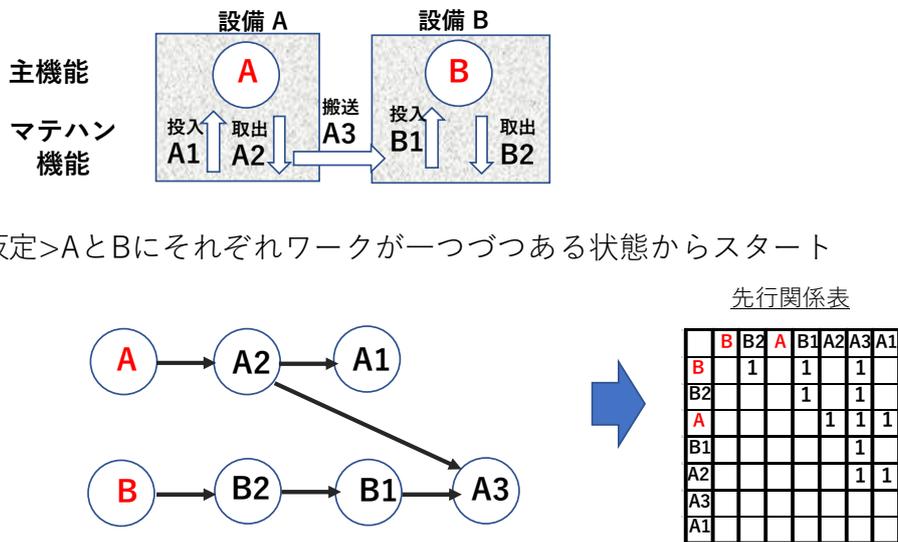


図 47 同時並行的に進む機能を考慮した先行関係図づくり

ハン機能の先行順序を明確にして関係を明らかにする必要がある。図 46 は極めて単純な事例を示している。主機能 A,B がある中で、主機能 A には、A1,A2,A3 のマテハン機能があり（例えば投入、排出、搬送）、主機能 B には B1,B2 というマテハン機能がある。それらの先行関係は、図中央に表すように、A,B それぞれの機能において、 $A1 \Rightarrow A \Rightarrow A2 \Rightarrow A3, B1 \Rightarrow B \Rightarrow B2$ となる。それらの先行関係を表に表したものを図中の右に示す。先行関係表は縦軸に書かれた工程が横軸に書かれた工程より先行関係にある場合「1」が表記してある。なお、主機能 A と主機能 B との関係においては、ii) で述べるので、ここでは関係は表していない。

ii) 同時並行的に進む機能の関係を考慮

従来の先行関係図においては、対象となる製品側から見た機能の順序を順番に見ればよく、1 個の製品に関わる作業の流れとして関係を明確にする図だった。

本システム設計においては、現実となるラインのサイクルタイムを求める必要があるため、ライン内にある複数仕掛品が同時並行的に機能が進む中で、マテハン機能のお互いの先行関係を明確にする必要がある。図 47 で例を示す。この事例の場合、スタート状態を主機能 A, B それぞれにワークが入っているという前提としている。A の主機能による機能が終わったのちに A2 により排出されると、その後 A1 が A に製品を投入する事が出来る。同じく主機能 B も同様に、B が終われば B2 によって排出し、その後 B1 によって B に投入される。この時、A と B の関係において、A3 は A2 が終わらないと製品が無いので作業できないと同時に、B1 が終わらないと製品の置き場がないので動くことが出来ない。この時点で A と B の結びつき関係が決定され、図中で表すように、A2⇒A3 のつながりと B1⇒A3 のつながりが出来る。それによって先行関係表は図中に表されるように、図 46 から大きく変わる。なお、この条件を決定するためには、ライン内に入れる仕掛品の数と初期位置を定めなければいけないが、それは前提条件として設定する。

iii) マテハン装置の割り当てを考慮

i), ii) によって関係性を明確化したマテハン機能に対し、それぞれの機能にマテハン装置が割り当てられることになり、その制約上での先行関係を明確化する必要がある。実際の機能順序を決めるにあたっては、割り当てられた機能群

拡張③：マテハン装置の割り当てを考慮

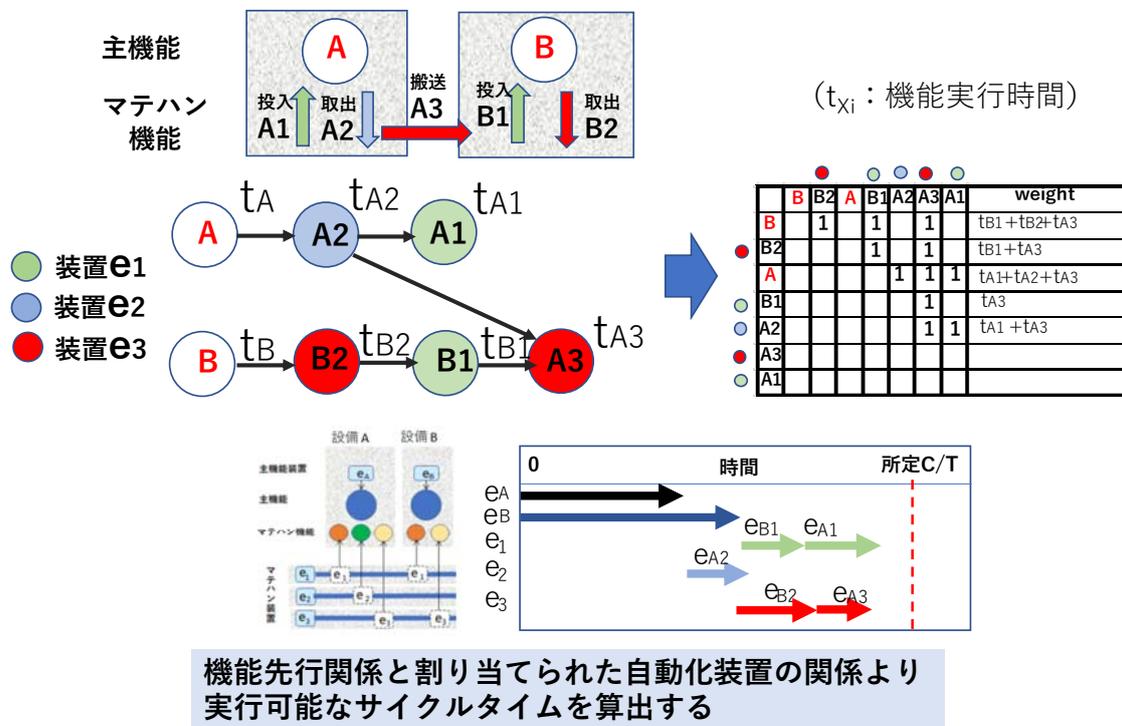


図 48 マテハン装置の割り当てを考慮した先行関係図づくり

る。それらについては、機能を実行するマテハン装置が主機能設備間をまたいで移動を行うため、ラインレイアウトによって結果が大きく異なることになる。したがって、設計時には前提条件としてラインレイアウトを決めておく必要がある。これらは対象となる製品や工程の特徴に合わせて検討するパターンをあらかじめ決めておけばよい。装置が移動する時間については、主機能位置の相対的位置取りを基本に、距離と速度で計算することとする。

本方式の場合、ライン内にある複数製品が同時並行的に作業が進むという形になるので、ライン内に投入される製品の数と初期位置によって結果が左右される。これらについては、計算時の前提条件として任意に設定可能である。加えて作業が同時並行的に進むという事は、各サイクル間の切れ目が明確ではなく、例えば 1 サイクル目の終わりと 2 サイクル目の始まりは複数のマテハン装置間において一般的には常に時間的重なりが発生する。そういう状況の中で定常状態を見つけ出しサイクルタイムの計算が必要である。今回の場合、サイクル数とサイクルタイムの関係を調査したところ、2 サイクル目のサイクルタイムを採用すれば問題ない事が分かったので、その値を使用する。図 50 は、図 48 と同じ事例を用いて表した事例である。図の中で 1 サイクル目は先行関係の通り各装置が動くが、2 サイクル目は 1 サイクル目に実行する機能すべてが終わる前に始まる。この事例の場合 e_{B1} による B1 の実行が終わった時点で主機能の B は動き出すことができるので、この時点で 2 サイクル目がすでに始まる。その後各作業は 1 サイクル目とは違う動きをする。 e_{A2} による A2 の実行と e_{B2} による B2 の実行タイミングがずれることにより、 e_{A3} による A3 実行に待ちが発生し、1 サイクル目は e_{A1} による A1 実行の終了が全サイクルの終了であったが、2 サイクル目は e_{A3} による A3 の実行がサイクルの終了となる。3 サイクル目以降は 2 サイクル目と同じタイミングが定常状態として繰り返されるため、2 サイクル目のサイクルタイムを見ておけば良い事になる。

なお、2 サイクル目の計算においては、1 サイクル目は 2 サイクル目に先行するとして定義をし、先行関係図を繰り返し分だけ繋げて作業を実行するプログラムとしてある。図 51 は 2 サイクル分の先行関係図を事例として示す。図中の上半分は単純繰り返しとして 1 サイクル分を 2 つ繋げた先行関係図となるが、これらは簡易的に表現すれば、繰り返しとして図中下部のように表現可能である。

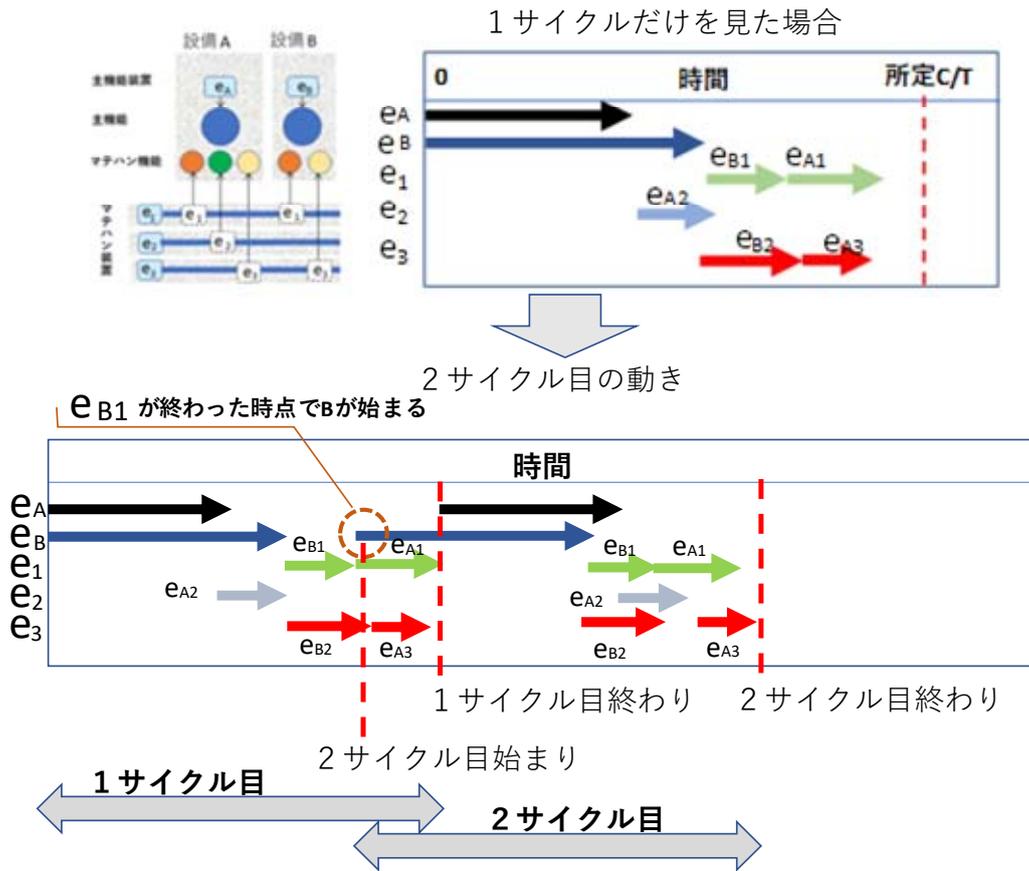


図 50 サイクル数によるサイクルタイムの変化

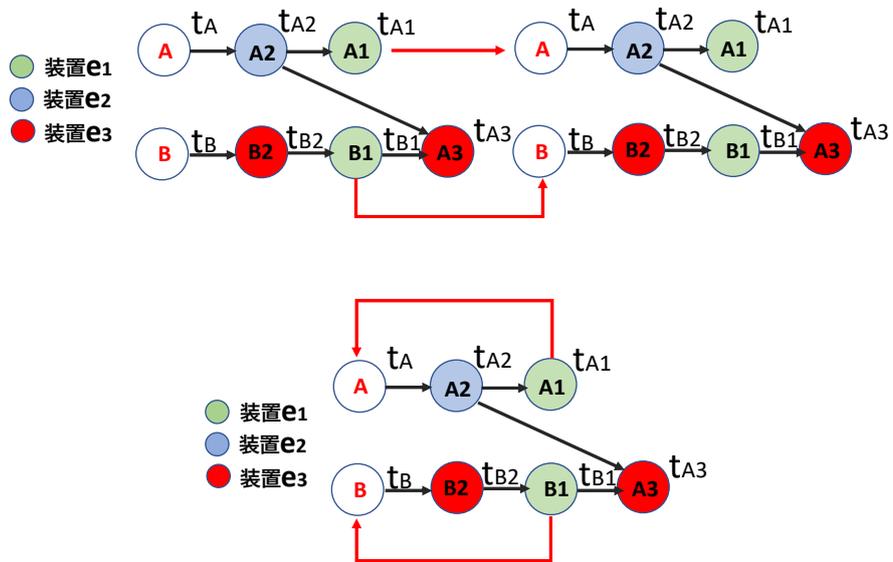


図 51 複数サイクル時の先行関係図の作り方

4.3.3 タブーサーチによる機能順序の最適化

4.3.1 で述べたように本設計法においては、製品 1 台あたりのコストを最小化する事を目的とし、機能グループの組合せと、それらの機能を実行するマテハン装置の近似最適解を GA で探索する。その際にはサイクルタイム評価が必要となるので、機能実行順決定には H&B の位置的重み付け法を用いる。H&B 法による位置的重み付け法は総計算時間の関係から、サイクルタイムの算出にあまり多くの時間をかけられない事から選択した方法で、求まるサイクルタイムは概算値である。しかし実用上は、より正確なサイクルタイムを求めておく必要があるので、GA で得られた機能グループとマテハン機能装置の組合せの近似最適解に対して、タブーサーチ (TS) を用いて機能実行順序の最適化を行い、それに基づいてサイクルタイムを計算し直す事で精緻化を行い、最終的な製品 1 台あたりのコストを得る。

TS の一般的な流れに簡単に触れておく。TS はメタヒューリスティクスの手法の 1 つであり、F. Glover によって提案されている^{[43] [44]}。要素として最適化したい対象と、その評価値、既に探索した解を記憶しておくタブーリストを用いる。TS はランダムに選んできた解を中心として探索を開始する。続いて、中心となる解の近傍解を規定数生成し、その評価を行い、タブーリストにない近傍解のうち、最良の解を次の中心となる解と定める。堂々巡りを避けるため、次の中心と定めた解をタブーリストに追加する。中心を、先ほど求めた次の中心へ移し、近傍解を生成するというサイクルを繰り返すものである、終了は GA と同じく規定回数サイクルを繰り返して、タブーリストや、現在の中心解とは無関係に、一連の流れで最良だった解を出力して終了とする。

TS はメタヒューリスティクスの手法として GA との併用、または比較検討する研究も数多く行われている。^[45] 設備仕様分野での事例も存在し^[46]、GA と比較して計算量および局所的な探索に優れる。

本設計法では、TS を機能グループ内の順序最適化に利用する。故に、先に紹介した基礎的な流れと異なってランダムな初期解ではなく GA の中で H&B 法を適用して導き出したマテハン装置ごとの機能実施順を初期解として、同じ機能グループ内間での機能順の入れ替えをした近傍解を探索する。また精緻な解を求めるために実施しているので、単純な繰り返し回数で終了するのではなく、最良解の更新が行われなくなった回数を監視して終了とした。終了条件のバリエーションについては参照論文[44]についても記載されている。順に詳細に説明していく。

個体の表現は、4.3 の GA とは違い、自動化装置ごとに区切られた内容とする。マテハン装置ごとに、その装置が実行する機能番号を実行順に並べたジャグ配列を解の表現方法とした。まず、機能順序をわずかに変更した近傍解を複数生成し、その中の最も CT の小さい解に遷移する。その後タブーリストと呼ばれる過去の

解の遷移情報が記憶されたキューを参照し、直近で同様の遷移が行われていないかを確認する。これにより状態遷移がループすることを防ぐ。その後、得られた CT 最小の解から再び近傍解を生成することで改悪を許しながら状態遷移を繰り返し、最終的に近似最適解を得る。詳細な手順は次の通りである。

- i) GA で H&B 法を用いて導出したマテハン機能の実行順を初期解とする。
- ii) iii) で選択された解 (1 回目は初期解) を対象に以下の手順で近傍解を生成する。

Step1 :

ランダムに機能を 1 つ選択する。選択した機能を実行するマテハン機能装置が担当している他の機能で、ランダムに選択した機能と機能順を変更しても先行関係を満たすような機能と実行順を入れ替える。この際、入れ替える機能を探す順番は、ランダムに選択された機能と実行順が近接している順とする。

Step2 :

Step1 を必要な近傍解の数だけ繰り返す。この際、タブーリスト内に同じ実行順の解がある場合、その解は却下しもう 1 度解を生成しなおす。

- iii) ii) で生成した解の CT を評価し、 CT が最小になった解と暫定最適解の CT と比較する。暫定最適解より CT が小さくなる場合は暫定最適解を更新する。(ただし、1 回目は CT 最小解を暫定最適解とする。)
- iv) iii) で生成した近傍解の中の最小 CT の解をタブーリストに追加する。追加時に解の数がリストサイズ以上になる場合、解は後入れ先出しとし、溢れた解を削除する。
- v) 暫定最適解の更新が一定期間以上行われなかった場合、探索を終了とする。それ以外は iii) で生成した近傍解の中の最小 CT の解を保持し ii) へ戻る。

これらの概要を図 52 に示す。

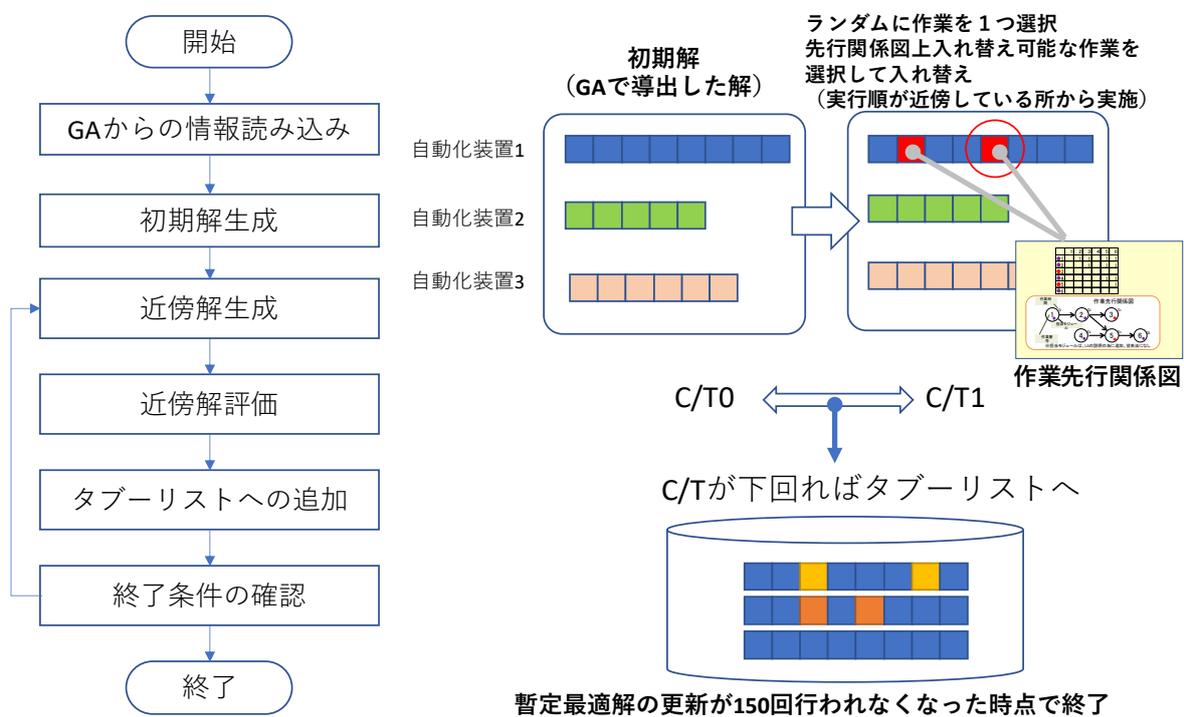


図 52 タブーサーチの概要

5. 新設計法の検証・評価

5.1 対象製品と工程概要

4 章にて述べた設計手法を，自動車部品であるエンジンを制御するエンジン ECU の組み立てライン設計に適用した．図 53 に示すように，電子基板をケースに組立，その後シール材の塗布やカバー組立，ねじ締めなどを経て，性能検査を実施するという工程であり，全主機能数は 14，それらの主機能を成立させるマテハン機能の数は全 78 ある．このうち主要なマテハン機能種をほぼ含む前半部分（表 3 赤点線内）を対象とした．この中には，主機能数 8，マテハン機能数 41 が含まれる．対象を前半部分だけにしたのは，サイクルタイムと機能数の関係より，グルーピングできる機能の数を考えれば，設計法を検証するには十分なサイズであり，これ以上増やしても装置数が単純に増えるだけであるからである．具体的なマテハン機能を表 5 に示す．

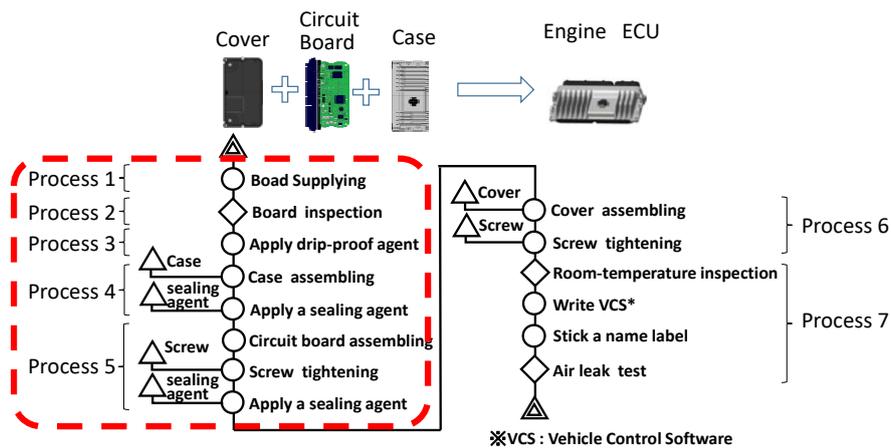


図 53 エンジン ECU の工程系統図

表 5 ケーススタディで用いた全マテハン機能

基板供給	基板入りマガジンを搬送する
	基板入りマガジンを停止させる
	マガジンを片寄して位置決めする
	マガジンを下降させ次を取る基板の高さを調整する
	基板を1枚プッシャで押し出し、コンベアに載せる
	反転コンベアに基盤を搬送する
	基板を位置決めする
	基板をコンベアごと反転する
	基板のQRコードを認識する
	基板を次工程へ排出する
	コンベアの川幅を変更する
基板検査1	基板を前工程から搬送する
	基板を停止させる
	基板のQRコードを認識する
	基板を取り出し検査STへ移載する
	基板を検査する
	基板を取り出しコンベアへ戻す
基板検査2	基板を前工程から搬送する
	基板を停止させる
	基板のQRコードを認識する
	基板を取り出し検査STへ移載する
	基板を検査する
	基板を取り出しコンベアへ戻す
防滴材塗布	基板を前工程から搬送する
	基板を停止させる
	基板のQRコードを認識する
	基板を取り出し治具へ移載する
	機内へ治具を引き込む
	基板に防滴材を塗布する
	機内から治具を引き出す
	基板を取り出しコンベアへ戻す
ケース供給	ケース入りマガジンを搬送する
	ケース入りマガジンを停止させる
	マガジンを片寄して位置決めする
	ロボットがマガジン内のケースを取り治具に置く
	ネームラベルをケースに貼る
	貼りつけられたか印字チェック
ケース組付	基板を前工程から搬送する
	基板を停止させる
	基板のQRコードを認識する
	ロボットが基板にケースをかぶせる
	基板とケースを保持したまま反転する
	基板&ケースを次工程へ送る
カバー供給	カバー入りマガジンを搬送する
	カバー入りマガジンを停止させる
	マガジンを片寄して位置決めする
	ロボットがマガジン内のカバーを取り治具に置く
カバー組付	シール材を塗布する
	基板を前工程から搬送する
	基板を停止させる
	基板のQRコードを認識する
	ロボットが基板&ケースにカバーをかぶせる
ネジ締め	基板&ケース&カバーをコンベアで次工程へ送る
	コンベアの川幅を変更する？
	ワーク(基板&ケース&カバー)を前工程から搬送
	ワークを停止させる
	ワークのケース側のネームラベルを認識する
	ワークを取り出し治具へ移載する
常温検査1	ワークにネジ締めする(4箇所)
	ワークを取り出しコンベアへ戻す
	ワークを次工程へ送る
	コンベアの川幅を変更する
	ワークを前工程から搬送する
	ワークを停止させる
常温検査2	ワークのケース側のネームラベルを認識する
	ワークを取り出し検査STへ移載する
	ワークを検査する
	ワークを取り出しコンベアへ戻す
	ワークを次工程へ送る
	コンベアの川幅を変更する

5.2 遺伝的アルゴリズムを用いた製品 1 台当たりの設備費最小化

5.2.1 前提条件

機能をグループ化し、割り当てたマテハン装置コストとサイクルタイムを計算するためには、各マテハン機能の空間的位置関係を明確化しておく必要がある。機能の空間的配置の影響は実際に設置する主機能のレイアウトに依存しており、計算の前提となるレイアウトを明確化する必要がある。一般的には主機能は工程順に並べる事が多く、それを前提とした場合、大別すれば、ラインの形は直線ラインか U 字ラインに分けられる¹⁴⁷⁾。したがって、本適用事例では、直線ラインと U 字ラインの 2 種類のパターンで主機能装置を配置し、複数のマテハン機能を実行する上で必要なマテハン装置の移動距離は、主機能装置間の距離から概算することとし、また、移動時間については、マテハン装置の移動速度 (1.56m/s) と主機能間距離 (0.9m) として所要時間を計算した。

また、サイクルタイム計算においてはラインに同時に存在する仕掛品の数とそれらの初期位置によって結果が変わってくる。投入する仕掛品数は主機能の数とバッファの数によって決定されるべきであるが、本検討においては、最適バッファ設置問題は次の課題として、主機能装置の前に 1 個固定バッファが存在するという前提とする。なお、ここで言うバッファとはライン内の空きスペースの事を言う。その条件において、ライン内に同時に存在する仕掛品は、主機能数と同数が主機能直前に存在するという初期条件で計算する。

GA の計算手法については 4 章にて述べたが、本事例における計算条件を表 6 に、本ケーススタディにおける対象全 41 機能の先行関係を図 54 に示す。

表 6 GA の計算条件

パラメータ	世代の個体数	64
	世代数	1800
	交叉法	一点交叉
	交叉点	ランダム
	突然変異率	0.05
	適応度	製品あたりの初期コスト
	選択法	エリート選択

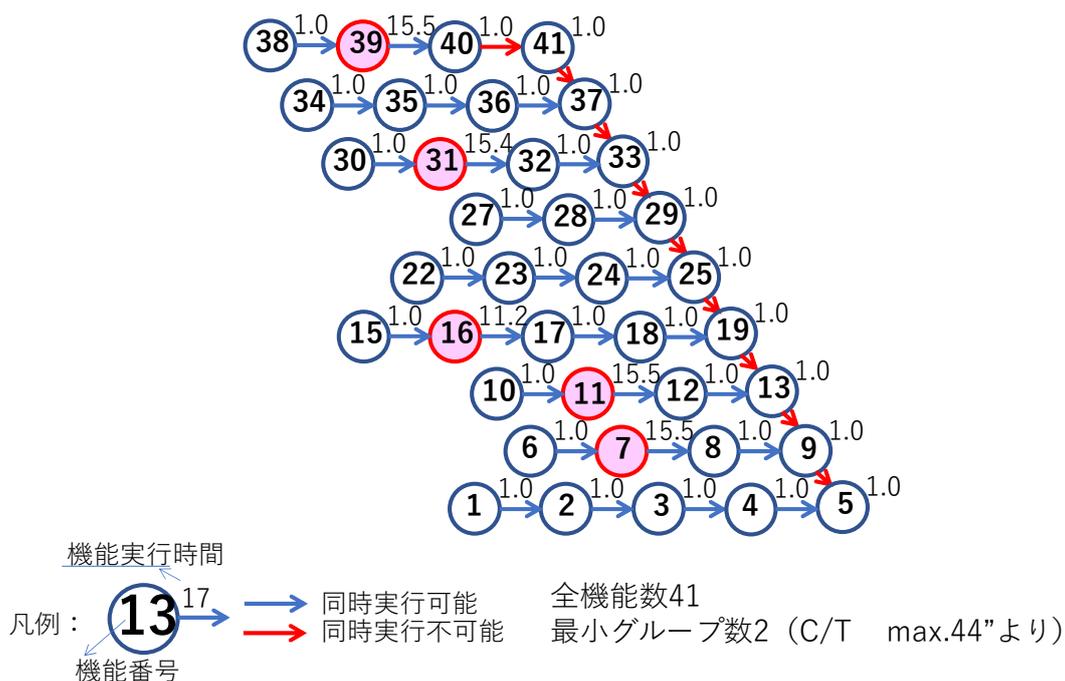


図 54 ケーススタディでの先行関係図

5.2.2 計算結果

計算結果を図 55 に示す。図は、U 字ラインにおけるマテハン装置数を 2 から 13 まで変化させたときの、各装置数における最適機能組み合わせでの装置コスト、サイクルタイム、および製品 1 個あたりのコストを GA 後 TS まで実施した最終解を示している。なお、計算をグループ数 13 までとしたのは、グループ数 11 以上でサイクルタイムの改善が見られないため、13 以上グループ数を増やしても改善する見込みが無いためである。縦軸にとった 3 つの計算結果は、グループ数 13 を 100 として指数化してある。本ケーススタディにおいては、U 字ラインのマテハン機能グループ数 3 において、移動型双腕多関節装置、垂直多関節移動ロボット装置、単軸水平移動装置を割り当てた組合せが製品 1 個あたりのコストが最小となる事が分かった。最適解における主機能装置とマテハン装置の配置図と効果のまとめを図 56 に示す。

ケーススタディで用いたエンジン ECU については、従来設計法で構築された組立ラインが現存し稼動している。それは、従来の一般的設計手法で構築されている。それと比較して、今回提案している新たな設計手法では、マテハン機能装置コストを 39%低減可能と推定される。この結果より、当初の狙いであった設備費コストダウンという点で本設計手法の有効性が確認できたといえる。

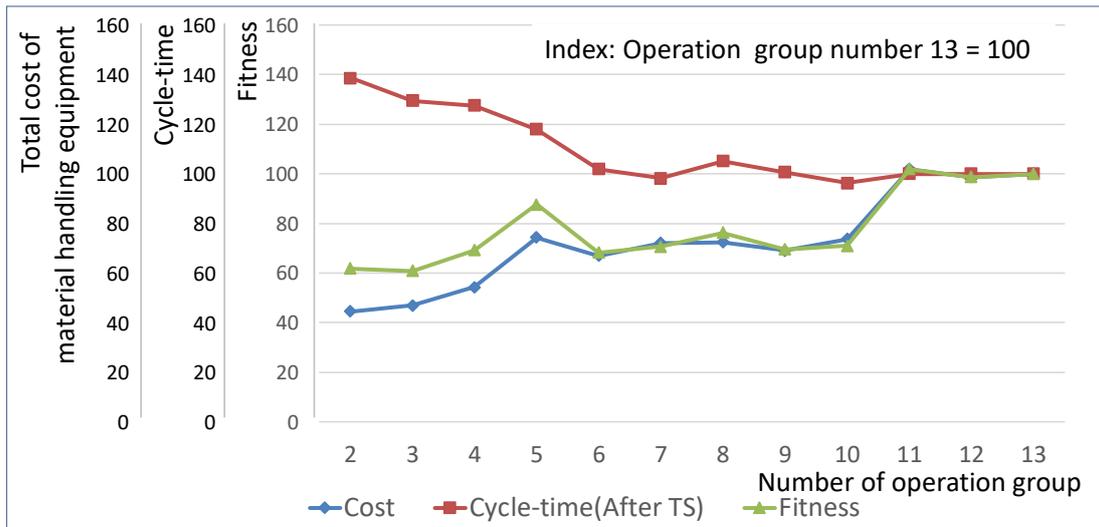


図 55 計算結果

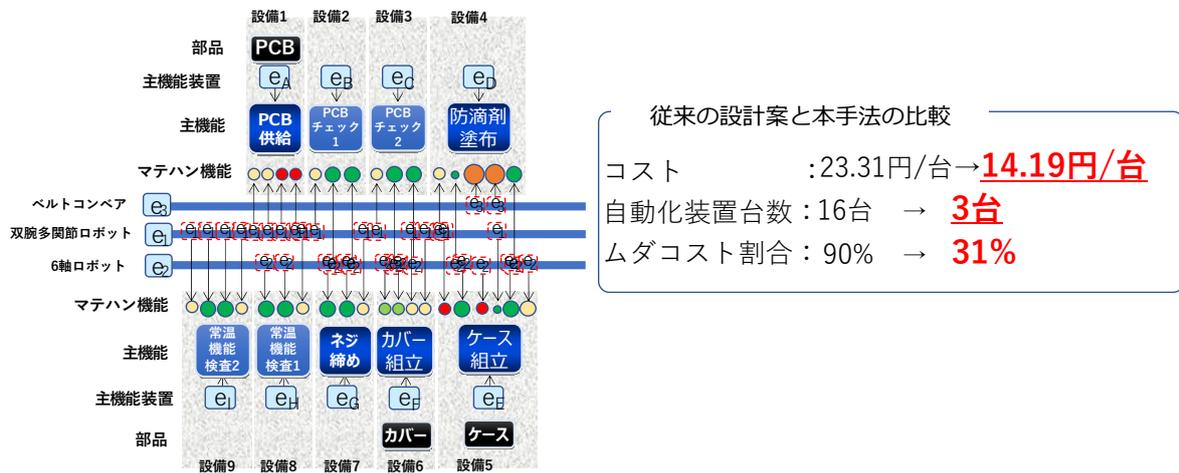


図 56 最適解における主機能とマテハン機能の配置図と新設計法の効果

なお、上記結果におけるサイクルタイムについては、4.3.2 で述べたように初期状態から作業を開始後、2サイクル目の値をとっている。初期状態から10サイクル目までのサイクルタイムを確認したが、詳細の動きについて図 57 ガントチャートで示す（4サイクル目まで）。データは本計算において最も安価となったグループ数3のケースでの結果である。図では、サイクルごとに色を分けて示してある。1サイクル目については、機能開始から最後の機能が完了するまでに34.9秒かかっているが、2サイクル目では、1サイクル目の機能実行が終了するおよそ3.5秒前に、すでに最初の機能実行が始まっている。このように後サイクルの機能実行が前サイクルの機能実行中に入り込む分を差し引いて求めたサイクルタイムを、機能実行開始後のサイクル数に対してプロットしたのが図 58 である。この結果が

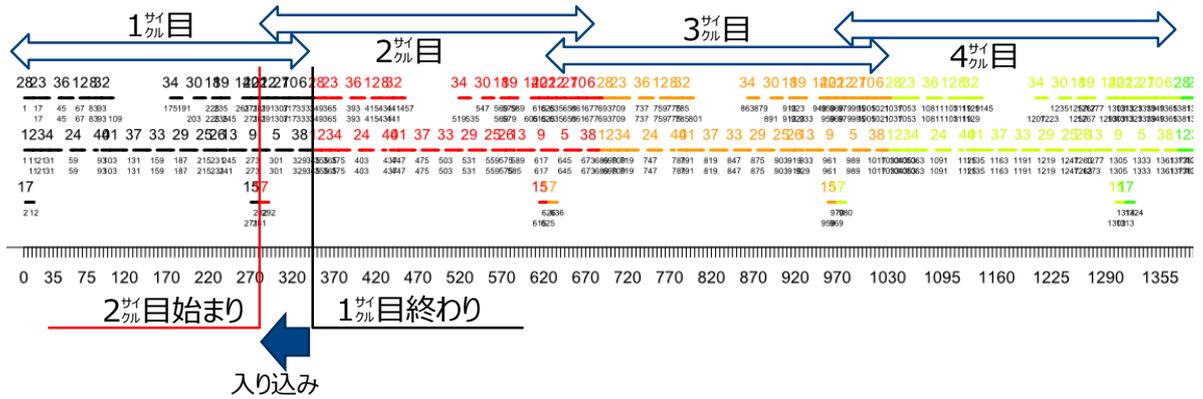


図 57 各サイクル間の時間的関係をあらわすガントチャート

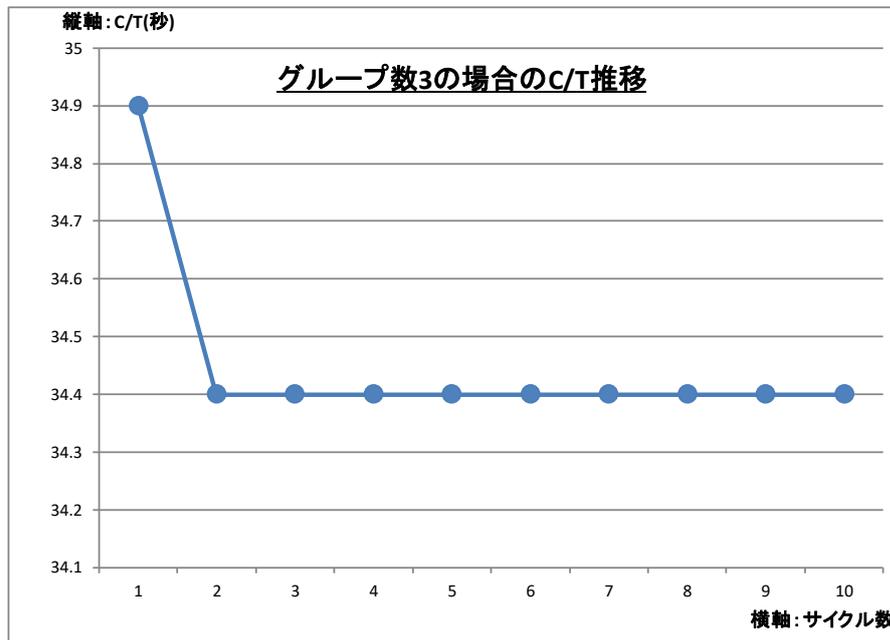


図 58 各サイクル数におけるサイクルタイムの変化

ら、連続して機能を実行する場合のサイクルタイムとしては、2 サイクル目の値を用いれば問題ないことが確認でき、設計法として問題ない事が確認できた。なお、ここでは3 グループの事例を代表として示したが、5 グループ、8 グループでも同様に確認を実施し2 サイクル目の値を用いれば問題ないことを確認した。

5.3 結果の考察

本設計法全体を通じた考察を以下に述べる。マテハン装置の稼働率を上げ、それによりトータルコストを下げていくためには、マテハン機能をグループ化することにより得られるマテハン装置数削減によるコストダウンが、機能グループ化

による機能アップにともなう装置自身のコストアップより大きい必要がある。機能グルーピングには、極力類似機能を集める方法と、極力場所が近い機能を集める方法の2つの方針が考えられる。類似機能のグループ化は、マテハン装置に求められる機能変更を最小限にする事が可能となるが、離れた場所での機能が必要となり、装置そのものに移動機能が求められる。一方の極力場所が近い機能を集めるやり方は、マテハン装置に移動機能を必要としない場合が多いが、一般的には異なる機能のグループ化が必要となり、その中で最も高機能を必要とする機能に合わせてマテハン装置を選択しなければいけなくなるので、その結果低機能装置で十分な機能にも高機能装置が使われることになりムダが生じる。また、装置コストの観点でのグループ化の方針としては、装置の負荷が低くても安い装置を多数用いて機能を分散させ総コストを下げる方法と、高い装置で極力多くの機能をグループ化するという選択がある。これは2章で述べたように、人と違い自動化装置は機能の制約とコストが装置によって大きく異なるために発生する。さらに、機能順序による干渉によりサイクルタイムが変わってくるため、機能のグループ化においては、そのバランスも考慮する必要がある。これらの考えなければいけない多くのパラメータに対して、従来の設計手法では主機能単位でマテハン機能の最適化を図る、すなわち空間的配置を優先して設備1台単位という狭い範囲で最適化を図っていた。本研究が提案する新しい設計手法においては、生産ライン全体を捉え、従来のような空間的配置の制約だけにこだわる事なく、機能の類似性や各マテハン装置のコストやサイクルタイムまでも考慮し、これらのバランスを取りながら最終的にはコスト的に最も競争力ある組み合わせを求めている。

本手法の有効性は既に前述の計算結果で示したが、個別項目ごとにその効果を考察する。考察においては、アルゴリズムの妥当性、マテハンシステム設計全体の妥当性、設計手法の適用範囲の広さの内容でまとめる。

5.3.1 アルゴリズムの妥当性

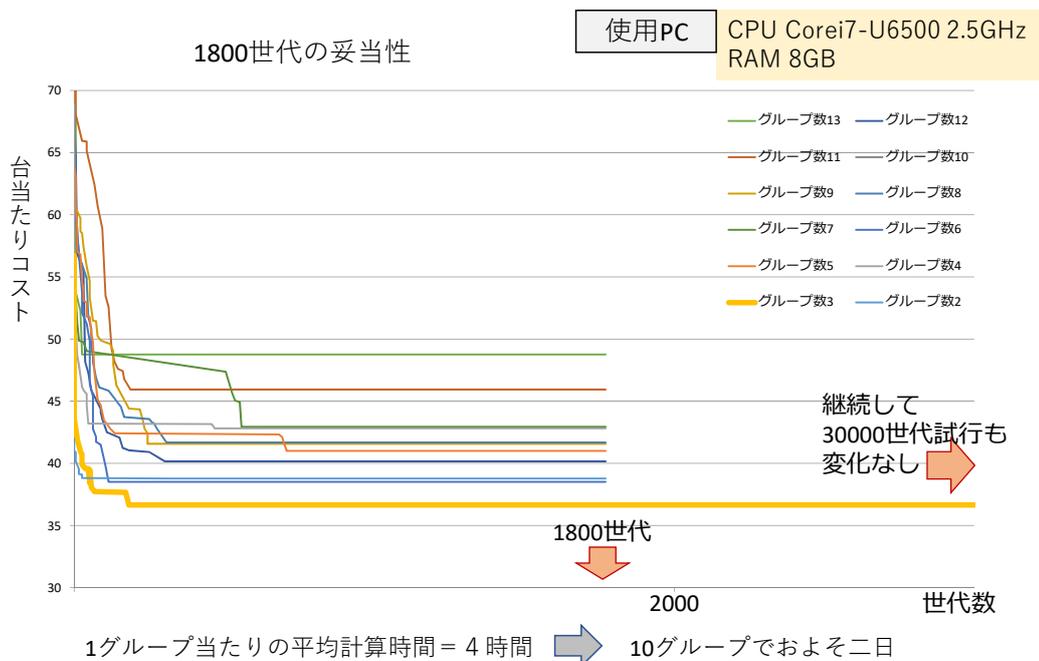
本設計手法の開発方針の1つに、実用性ある手法確立というのを掲げていた。実用性ある、という意味は、計算として必要な時間が実務上妥当である事である。何時間以内であれば妥当か、というのは定量的に理屈で言える話ではないが、実際の実務上耐えうる期間として、1-2日間という期間を目安に考えた。本計算においては、GAにおける計算世代数は1,800世代として実施したが、この世代数における計算時間は、1グループあたり平均4時間となり、全13グループでの全計算時間はおよそ2日、という事になる。なお、計算に用いたパソコン性能は、CPU Corei7-U6500 2.5GHz, RAM 8G という一般的なものである。

1,800世代での計算が、世代数として十分かどうかについては、図59に示すよ

うに同条件で計算を 30,000 世代まで実施し、計算結果が変わる事なく 1,800 世代で収束していることを確認し、今回のケーススタディの範囲では 1,800 世代が実用に耐えうる条件であることを確認した。

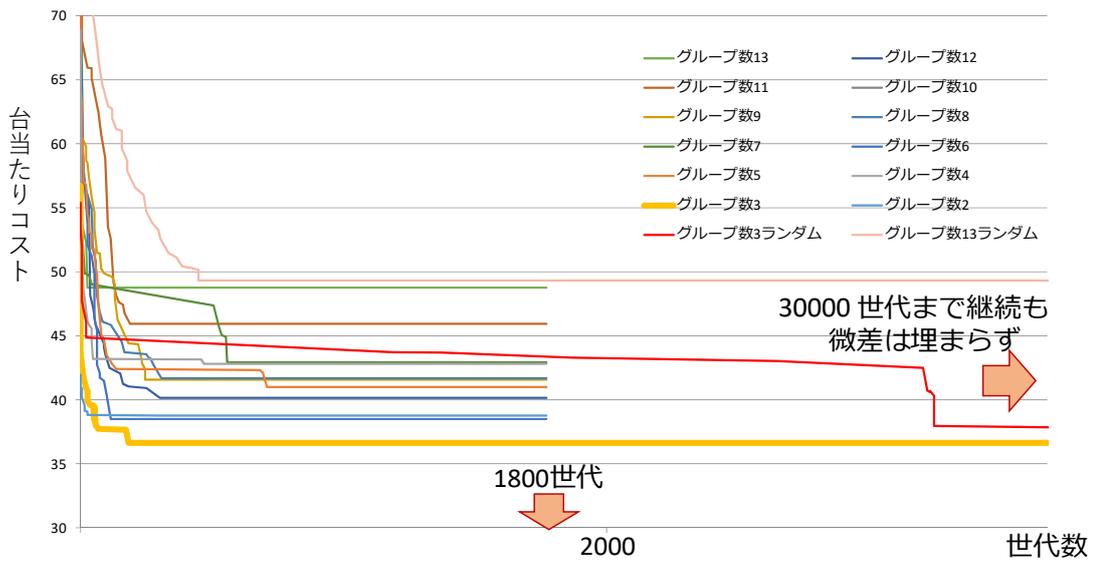
また、今回の設計手法で採用した、マテハン機能の属性値を用いた類似性によりクラスタリングを用いた後に遺伝的アルゴリズムで解を探索するという方法の妥当性について検証を行うために、初期解としてクラスタリングの結果を用いて初期解群を生成した場合とランダムに初期解群を生成した場合の比較を実施した。結果を図 60 に示す。今回最適解である組み合わせの 3 つのグループのパターンにおいて、図中黄色線が初期解群作成にクラスタリングを用いた場合、赤線がランダムに初期解群を生成した場合である。図を見て明らかなように、初期解群の生成にクラスタリングを用いた場合は収束が速く、今回設定した 1,800 世代で満足できる解が得られている一方で、初期解群にランダムな組合せを用いた場合は解の収束が遅く、今回の場合は 30,000 世代まで確認しても同じレベルまでは到達できなかった。実用的な解法という点において、クラスタリングの結果を用いて初期解群を生成する方法が十分有効であることが確認できた。

1,800 世代前提でクラスタリングの有り無しの比較を全グループ数について確認した結果を図 61 に示す。図を見て明らかなように、すべてのグループにおいて、クラスタ分析の結果を参照して生成した初期解を用いた方が良い解の探索が可能であることを示している。機能の類似性に着目する事がコストダウンに有効なことが計算結果として表れており、当解法の有効性が確認できる。なお、計算は U 字ラインにて実施した。



解の妥当性と実用的な時間内での計算を両立

図 59 1800 世代の妥当性検証結果



初期解にクラスタリングを使用する事は大きな効果
 ⇒実用的な計算時間に大きく寄与

図 60 初期解群生成にクラスタ分析を用いる効果

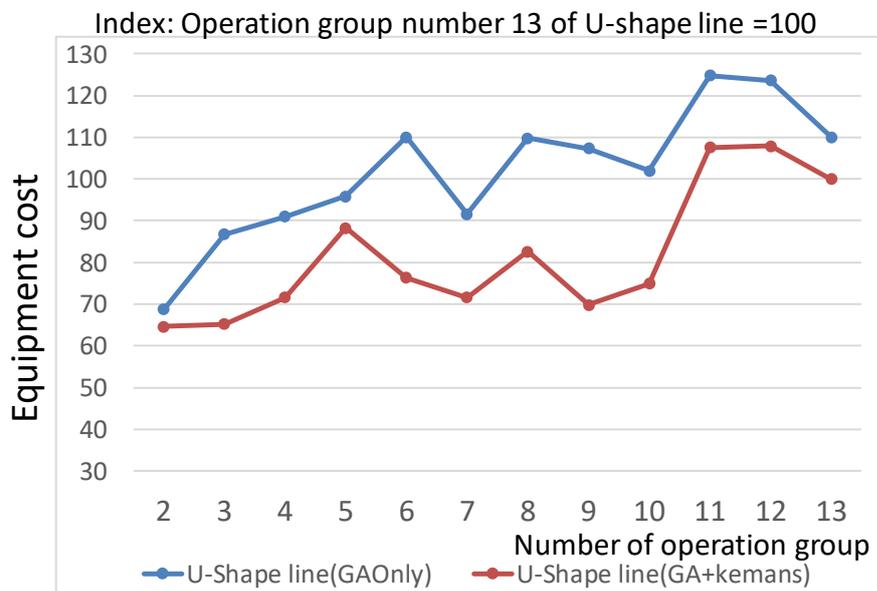


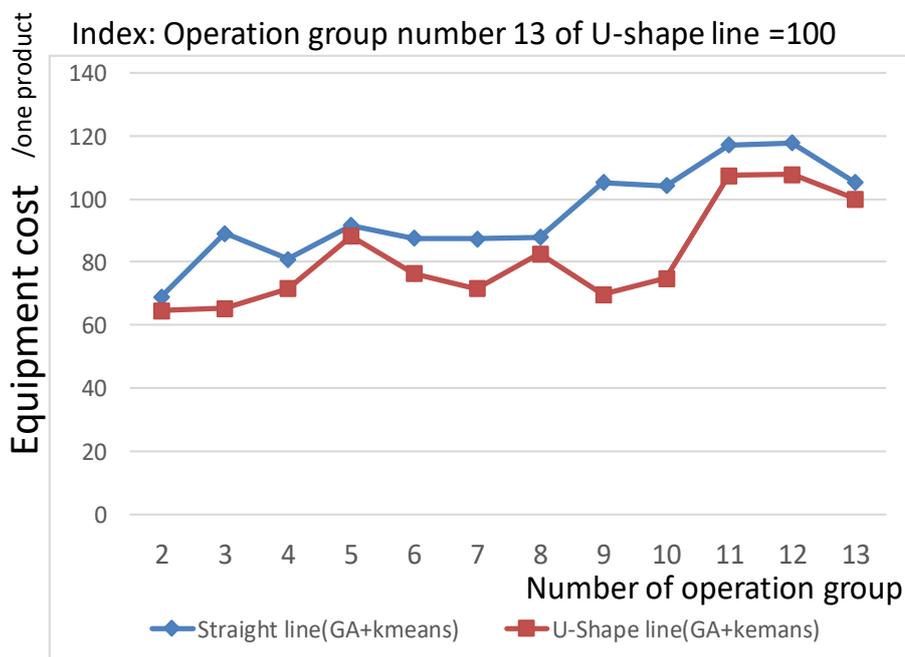
図 61 U字ラインにおける全グループ数でのクラスタリング効果

5.3.2 機能・空間的配置・コスト等，複数要因を考慮したシステム設計法としての妥当性

まず機能の類似性に着目する事によってコストダウン効果が得られる1つの根拠として，GAにおける初期解に機能の類似性をベースとしたクラスタ分析を用いれば，最終的に良い結果が得られるという事が挙げられる．図61に示した通りである．すべてのグループにおいて，クラスタ分析を用いて初期解群の生成を用いた方が良い解の探索が短い世代で可能であることを示しており，機能の類似性に着目する事がコストダウンに有効なことが計算結果として表れており，当解法の有効性が確認できる．

また，機能の類似性とともにも，空間的配置の関係も大事な要素であるが，それを表すデータとして図62にストレートラインとU字ラインの比較を示す．今回のケーススタディでは直線ラインとU字ラインの2種類のレイアウトを設定して計算を実施したが，全ての機能組合せにおいて，直線ラインよりもU字ラインの方が良い解が得られた．これはU字というラインの形態が，直線ラインに比べて機能のグループ化時の移動距離が少なくグループ化の効果を出しやすいためである．

U字ラインとストレートラインの比較



どのグループにおいてもU字ラインの方が良好な答え
 ⇒U字ラインの方が機能グルーピングがやり易く効果的（手作業ラインも同じ）
 ⇒新設計方法がうまく機能している事を表している

図 62 U字ラインとストレートラインの比較

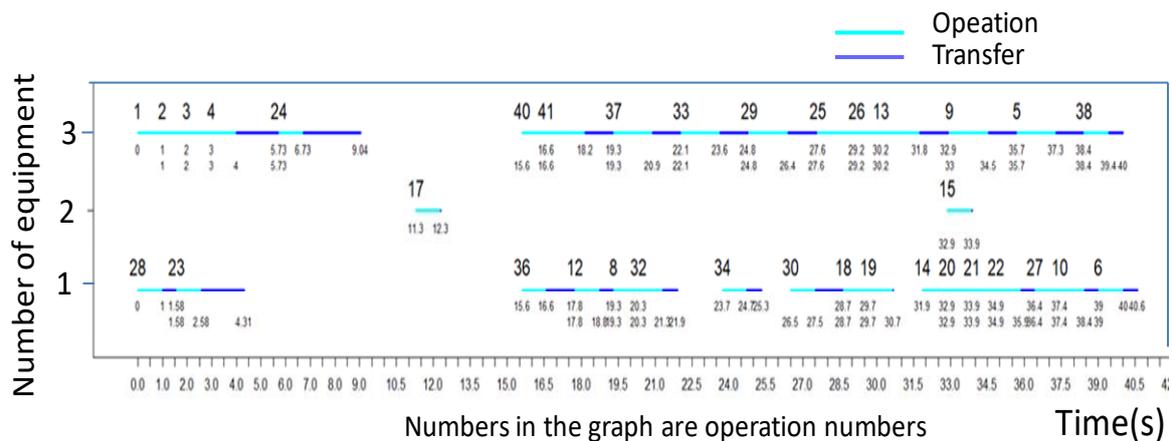


図 63 最適解のマテハン装置のタイムチャート

ると考えられる [47] [48]。この面からも当計算手法の有用性が確認できた。

また、機能の時間的干渉なども考慮したサイクルタイムも含んだ形でのトータルコスト最適化という観点において、図 56 の装置配置図を見て分かるように、今回のグループ化においては、比較的同じ機能がグループ化されているが、例えば製品の主機能への授受機能（図中 e_2 : 6 軸移動ロボット装置）は、設備間の仕掛品受け渡し機能（図中 e_1 : 双腕多関節移動装置）とほぼ同じ機能であるにも関わらず、機能の干渉を避けサイクルタイムを短縮した方がコスト的に有利となる判断により機能分担されていると考えられ、この思想が計算結果によく表れており、設計手法としての考え方が有益であることを示している。

機能とコストと言う観点においては、図 63 に示すガントチャートにて、各マテハン装置の動きをみるとその効果がよく分かる。装置 1, 3 は、ほぼ隙間なく動き続けているのに対して、装置 2 はほとんど動作してないのが図を見て分かる。これはマテハン装置 2 は安価な装置を使用しているために装置の動きのムダが全体コストに与える影響が小さいためであり、リーンオートメーションのコンセプトである「自動化装置の価値を考慮しながら稼働率を上げて必要装置数を削減することを通じて、マテハンシステムのコストを最小化する」という概念が計算結果に良く表れているのが分かる。

GA により得られた近似最適解をベースに、タブーサーチにより機能順序を最適化し最短サイクルタイム探索を行った結果、本ケーススタディでは GA で導き出した最適マテハン装置組合せにおいて、44 秒から 40 秒となり 10% 短縮が可能であった。計算した全てのグループ数において、タブーサーチ前後のサイクルタイムを比較した結果を図 64 に示す。なお、縦軸はグループ 13 を 100 として指数化してある。結果として全領域において平均 6% の改善効果があった。タブーサーチにより GA の解から大きくサイクルタイムが変化した場合、結果として製品

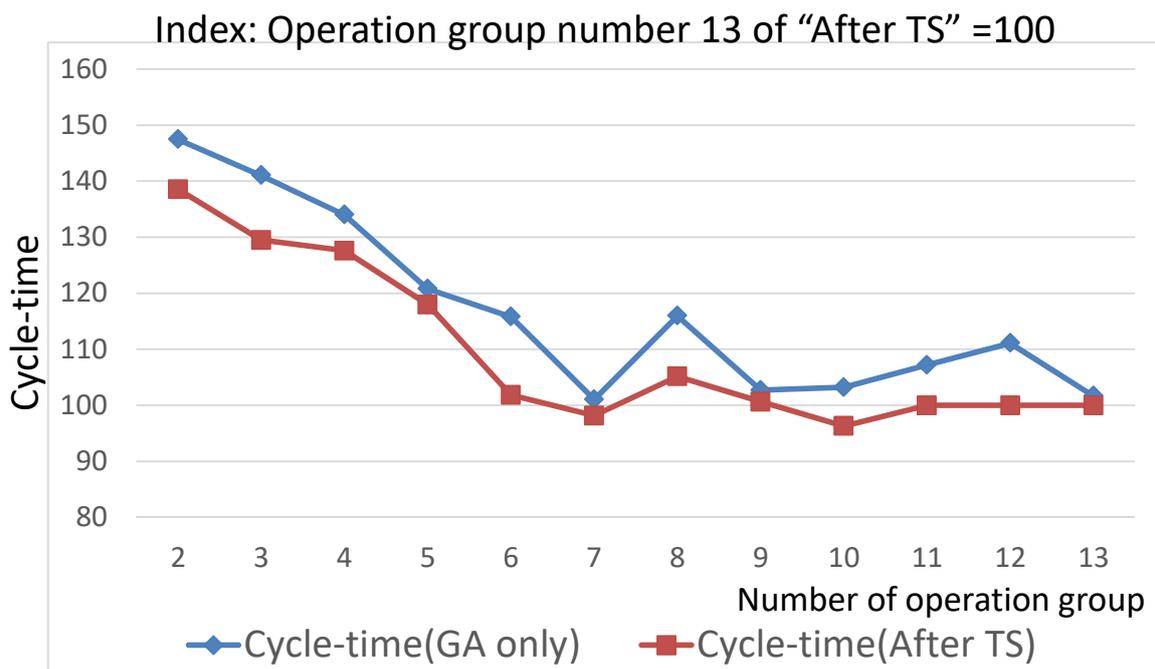


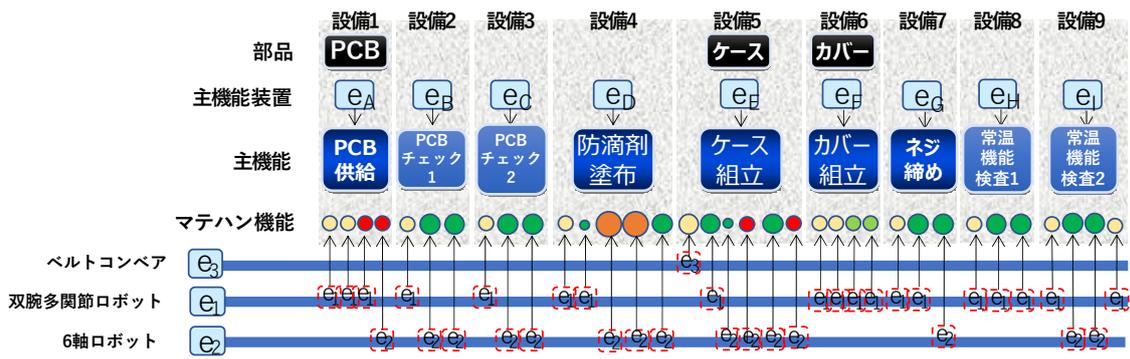
図 64 タブーサーチの計算結果（効果確認）

1 台当たり設備費も同様に变化する事となる．その变化の傾向に大きなバラツキがある場合，GA 内で探索したマテハン機能グループの組合せそのものを見直さなければいけない可能性がある．その視点で今回の結果を見れば，グループ間の優劣関係の傾向に変化はなく，GA で近似解を出した後にサイクルタイムについてはタブーサーチにより精緻な解を得るという方法が妥当である事が確認できた．

5.3.3 設計手法の適用範囲の広さ

当設計手法によるレイアウトの影響はかなり大きいと推定される．本設計法により直線ラインを設計した場合，図 65 のようになり，装置構成としては大きな差は無いが，コスト的にはかなり悪化する．

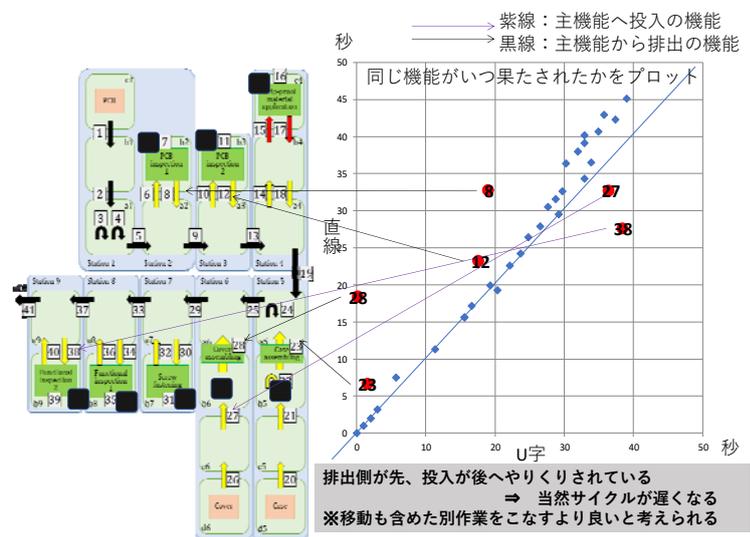
図 66 は，横軸に U 字ラインの各機能を行う時間，縦軸に直線ラインの各機能を行う時間がプロットされている．U 字と直線で全く同じ機能順序であれば，プロットされるデータはほぼ 45 度線上に乗る（正確に表現すれば，直線ラインの方が移動時間が大きいため，データは 45 度線よりも移動時間ロス分だけ上にプロットされる）．データを分析すると 85%は同じ順序，配置になっているが，残り 15%の違いによりコスト的には大きくロスをする結果となっている．これら 15%の項目は，機能の類似性によりグループ化されているが，距離的に離れたところにあり，それによりサイクルタイムロスが大きくなっている（それでも，この直線ラ



従来の設計案と本手法の比較
 コスト： 24.93円/台 → **19.61円/台**

U字ラインと同様の装置3台構成
 コストはU字より高価
 6軸ロボットの反復運動が特徴的
 ⇒レイアウトの依存性大

図 65 直線ラインでの構成



作業の順序は85%は同じ
 ⇒レイアウトの影響によるC/Tの差大

自動機の場合、主作業設備は工程順に並んでいる必要性は無い
 ⇒最も安価に構成可能な、自由な設備の配置順があり、今後の検討課題

図 66 ラインレイアウトがサイクルタイムに与える影響

インにおいては最適解). したがって、距離が遠くにある主機能の位置を調整し順序を入れ替えればサイクルタイムを大幅に改善できる可能性を持っている. 今回のようなマテハンシステムの場合、主機能装置は工程順に並んでいる必要性は無いことから、前述の結果は、もっとも安価に構成可能な設備の配置順がある事を示唆しており、今後の研究課題となりうる. このことは従来の発想である直線やU字のラインよりも、もっと自由度が高く自由に搬送可能な装置を作れば、大きくコストダウンが可能なポテンシャルを秘めていると考えられる.

リーンオートメーションコンセプトの最初の着眼であったムダに対する考察を行う。先に述べたように汎用的でありコストが高くムダが大きいマテハン装置に着眼し、そのムダを最小化することによってコストダウンを目指した。マテハン装置のムダとは、手待ちによる時間的なムダにコストを考慮したムダコストというものを定義し、そのムダを低減しつつコスト最小化を狙って設計法を開発した。手作業とは違いムダの最小化がコスト最小にならない所が研究のポイントである。その両者の関係について明らかにする。本ケーススタディにおいて計算を実施した全パターンにおけるムダコストと台当たりコストの関係を図 67 に示す。方向性としてはムダコストが下がれば台当たりコストも下がっていくが、必ずしもムダコスト最小と台当たりコスト最小は一致しない。これはムダを削減するためにかかる費用とムダを削減する効果とのバランスで結果が変わり装置の制約を受けているためである。

台当たりコストは、装置費用とサイクルタイムの関係より計算されるが、2.7の図 22 で示したように、ムダコストと価値コストに分けて表現することが可能である。ムダコストは、式(4) のように表される。

$$LP = M(1 - \eta)CT \quad (4)$$

(M : 装置総コスト, η : 装置稼働率, CT : サイクルタイム)

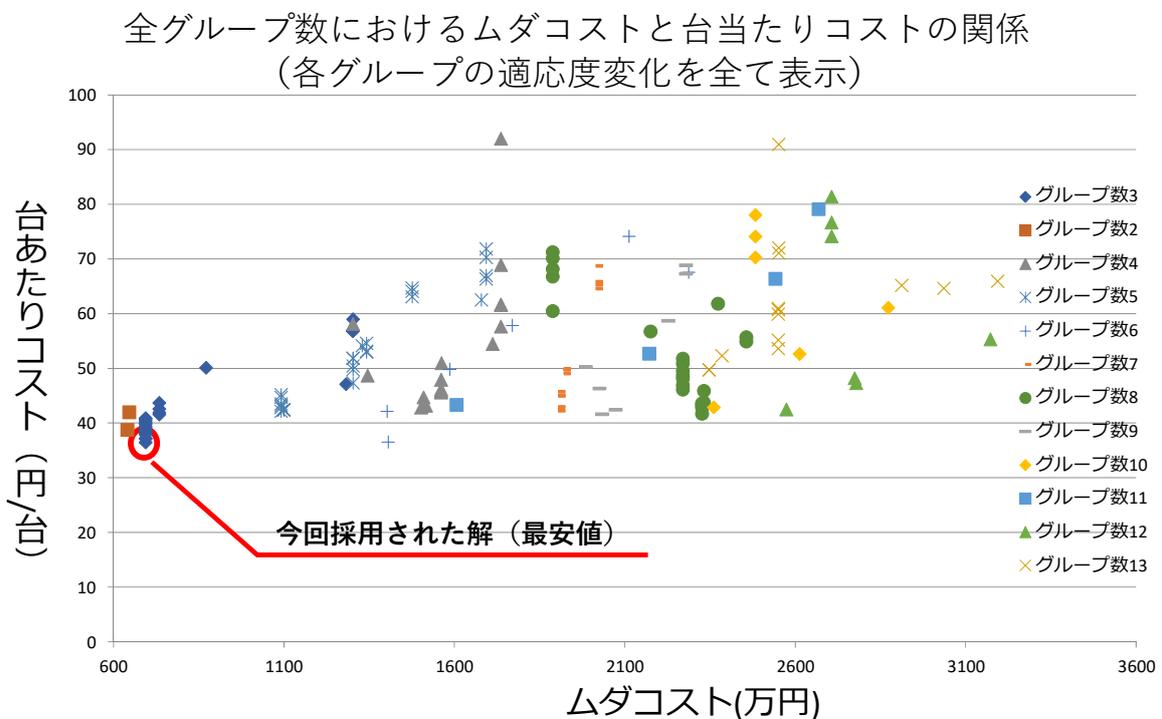


図 67 ムダコストと台当たりコストの関係

目的関数である製品 1 台当たりのコスト CP は、2.8 の図 26 内で示した式で表されるが、この式を変換してムダコストを用いて表せば式(5)のようになる。

$$CP = \frac{\sum_{i=1}^n LP_i / (1-\eta)}{T} \quad (5)$$

式(5)の意味するところは、製品 1 台当たりコスト CP を下げるには分母は稼働時間 T であり固定値であるため、分子を小さくするアプローチが必要である。分子はムダコストと不稼働率の比率で表されるが、ムダコストは装置費用と不稼働率の積で求められることから、結局これは装置費用そのものに他ならない。これは装置コストと非稼働率の改善効果との関係で決まり、それらはすべて装置のコストに依存している。ムダが非常に多い従来設計による状態を出発点にすれば、ムダを削減する事によって装置コストも下がるし、不稼働率も下がるが、やがてムダが減ってくると、装置コストは上昇に反転し、その時点から装置コストの上昇分と稼働率の向上効果のせめぎあいになり、最終的には両者がバランスする点が解となる。バランス点を見出すためには非常に多くのパラメータがあり解析的に解くのは難しいが、本研究を通じて、その解を得ることが出来る設計法が確立できたと言える。最終的なシステムコストは稼働率向上効果とそれにかかる装置とのバランスで決まることから、より効果を出すシステムを構築するためには、機能に見合った新しい装置の開発が必要であり、当研究結果はその開発の指針となりうることを示している。

最後に今回確立した新たな設計手法の将来展望について述べる。3.2 で述べたように、本設計手法にはマテハン装置ライブラリを必要とする。このライブラリに新しい装置が追加されれば、計算結果も変わってくる事となる。このことは、逆に考えれば、さらなるコストダウンや新たな生産システムを必要とした時に、必要とする新たなマテハン装置のスペックを明確化する事が可能であることを示唆しており、装置の開発ツールとしてのポテンシャルを持っている。また、ライブラリを使用してシステムを構築するという事は、生産システムが標準化された装置で構成されており、装置の転用性が高いという事を意味する。したがって当設計手法において適応度をライフサイクルで評価すれば、より長い期間でのライフサイクルを通じた最適解を導き出すことが可能である^[49]。今後のさらなる生産システムの進化を考えた場合、ロボットや制御機器の飛躍的進化により、人と機械が協調する生産システムが注目されている^{[50][51]}。人もマテハン装置と同じように、属性とコストを定義することが可能で、人をマテハン装置としてライブラリに追加をすれば、人と機械が最適に協調し高度に高効率を維持した新たな生産システムを設計する事が可能であると考えられる。情報化関連技術が進展する中で、モノづくりの世界は、機械が知能を持ち、自分自身が自由にモノを流し、よりフレキシブルな生産を機械自身が自律的に対応できる方向に開発が進んでいる。そういうモノづくりの世界においては、従来とは比べ物にならないほど、選択肢

の幅が増え最適化が益々難しくなる世界に突入していくと予想される。そういった世界において、リーンプロダクションの思想を反映し、フレキシブルとリーンが両立することが出来れば、非常に強力な競争力になる事は容易に想定され、日本のモノづくりが生き抜いていくための1つの方向性であると考えられる。そうした世界の中で、本設計手法はライン単位の最適化にとどまらず、工場単位での最適化、あるいは長期のライフサイクルにおける最適化にも拡張できるポテンシャルを備えており、今後の新しいモノづくりに一石を投じる事が出来る価値ある研究成果が出せたと考えている。この成果が日本のモノづくりの将来に貢献できるものと確信している。

6. 結 論

新興国での生産量増加や労務費向上，先進国の人手不足や製品の高度化などを背景として，世界的に自動化ニーズが高まっている．一方，環境問題や情報化技術の進化などにより，工業製品の変化スピードは著しく，今後の製品動向や生産量の予測は非常に難しくなっており，投資リスクが高まっている．そうした中，投資リスクを低減する方法は，従来から生産システムのフレキシブル性を向上し，市場の変化が起きてもそれに左右されない生産量確保を通して実現するという研究が行われてきた．今回，投資リスクを低減しコスト競争力を高める方法として，新たな着眼として投資額の削減が有効な手段である事に着目し，それを実現する方法として，オートメーション・ラインのマテハン装置の機能と動きにおけるムダを削減しコスト競争力を向上する「リーンオートメーション」コンセプトを提案し，その汎用的な設計方法の確立に取り組んだ．

リーンオートメーションコンセプトは，リーンプロダクションにおける作業管理分野の改善がもつばら手作業にのみ適用されることに対し，リーン化の考え方をオートメーション・ラインに適用し，マテハン装置の多機能化，多工程持ち化により待機時間の削減を通じてマテハン装置台数を削減し装置コストを抑えるというこれまでのオートメーション・ラインでは考えられていなかった新しい考え方である．

新たなマテハン装置の設計法は，マテハン機能の類似性を基準にクラスタリング分析を用いてグルーピングを行い，グルーピングしたマテハン機能に合致する最も安価なマテハン装置を割り付ける．その時に，1つのマテハン装置で複数のマテハン機能を実行するため，各マテハン機能の実行順序を決める必要があると共に，各マテハン装置間のマテハン機能の実行順序も決める必要がある．それをH&B法をベースに，機能の先行関係を使い，合理的な順序を決定する新たな方法を考案した．これにより算出できるサイクルタイムとマテハン装置のコストを用いて，製品1台当たりのコストを算出し，それを評価関数として最小化し，目標に適合可能な解を探索する方法として遺伝的アルゴリズムを用いてマテハン機能グループの組み換えとマテハン装置の割り当てを実施する方法を確立した．これらの計算を成立させるツールとして，マテハン機能の記述方法を定め，それをベースに定量的表現として機能の属性表を作成する方法と，その属性表を基にマテハン装置を自動的に選択可能なマテハン装置ライブラリの作成方法を考案した．

考案した新たなマテハン設計法を，自動車エンジン制御用コンピュータの組立ラインに適用し，約40%のコストダウン効果を確認し当設計法の有効性を検証した．今後は当マテハンシステムを用いて主機能装置のレイアウト最適化や更に競争力を上げるマテハン装置ライブラリの進化など，当設計手法の精度向上と範囲拡張に取り組むと共に，実用化適用を進めていきたい．

謝 辞

(株)デンソーに入社し 32 年の会社生活の中で、そのほとんどを生産システムの開発に従事しながら、生産の在り方を考えてきた。(株)デンソーは自動車部品製造業という生業の中で、生産システム開発に対して、自動化とリーン生産に強いこだわりを持ち、様々な新たな生産システムを世に生み出してきた。その中でも特にオートメーション・ラインでありながらフレキシブル性にこだわり新たなコンセプトを多く生み出してきたが、その根本には、「リーン生産へのこだわりから生まれた、設備機能をフルに使ったシステム」という強いこだわりがある。これらの様々なラインは、リーン生産と自動化に日々接する環境の中で、経験を積み、暗黙知として工程設計者の中に育つ個人的な能力で構築されたものと言える。世界の中での自動化ニーズの高まりと、環境変化に対応したリスク低減可能な投資が求められる中で、これまで培ってきたリーンなオートメーション・ラインに磨きをかけることが出来れば、投資そのものを削減する事が出来る。そうした今の時代にあった競争力を上げる生産システムが構築可能であると強く思う中で、これまで暗黙知として蓄積されてきた多くのノウハウを少しでも形式知化し後世に継いでいきたいと、ここ数年は考えてきた。

また、もう 1 つの見方として、生産技術とリーン生産の最も象徴的なアイテムである現場改善との融合という課題認識がある。一般論として、技術を中心に生産システムの進化を考える生産技術者と、今の現実をベースにモノと情報の流れを中心に現場改善を通じて生産の実力を上げていく TIE を代表とする生産改善部隊とは、思想的に相いれない性格を帯びているケースが多い。生産技術者は技術を中心に据え、目的達成型で手段を選ばず突き進むのに対して、生産改善部隊は長期にわたる生産体質改善により目的を達成するという手法、つまり、時間がかかろうがセオリー通りに活動を進めていくというプロセス重視型であり、先の目的達成型とは随分性格が異なる。生産技術者として自らの技術に磨きを掛けながら、工場やあるいは会社全体の管理者として現場を見てきた経験を通じて、生産技術と現場改善をいかに融合するか、というのは常に考え続けてきたテーマであり、その象徴が今回研究テーマにとりあげた自動化とリーンプロダクションの融合である。

それらの考えの下、これまでデンソーの中での経験を通じて構築されてきたリーンなオートメーション・ラインと現場改善から生まれるムダ排除の考え方の融合を目指し、リーンオートメーションというコンセプトを提案し、コンセプトレベルに立ち返って整理を行い、リーンオートメーションの在り方を論じ、定義付けを行うと共に、従来の暗黙知による工程設計から脱却し、理論的に構築できる方法を確立することを研究テーマとして取り上げた。日本の強みを活かしたリーン生産とオートメーション・ラインを融合した競争力ある姿を示し、モノづくり

領域への貢献を目指すために、汎用的リーンオートメーションの設計手法確立を通じて、誰もが設計できる状態を作り上げ、新たなシステム構築の可能性を広げたいと強く思って始めた研究である。

上司、同僚の提案もあって、この自動化とリーンプログラクションを融合するという問題を真正面から受け止め、一から考えてみるためにも研究テーマとして設定して学位に挑戦する運びとなった。非常に貴重な機会を得られた事に対して、まずもって感謝の念に堪えないが、一方で仕事で毎日を非常に忙しくしている身にとっては、挑戦してもやりきる事は難しいのではないかと、という不安もあり、言葉の通り清水の舞台から飛び降りる気持ちで始めた次第である。

そういう中で、3年半にわたり常にどんな状況においても、懇切丁寧に粘り強くご指導を頂いた高田祥三教授には、心より感謝申し上げたい。毎月の登校時でのご指導会において、懇切丁寧にご指導頂くと共に、進捗がはかどらないときには大きな方向性の示唆を常に頂き、論文作成時にはあくなき完成度の向上を目指し、納期ギリギリまで粘り強くご指導頂き、その親身なるご指導には感謝の言葉もない。ここに改めて感謝の意を表します。

また高田祥三教授と共にご指導頂いた大成尚教授においては、問題の核心部分を飾りのない言葉で常に指摘し続けて頂き、妥協する事なく真理を迫及する研究としての必要な姿勢と、研究そのものの本当の意味をご指導頂いた。ご指導頂いたものは、その考え方や妥協する事ない研究者としての姿勢など、私の生涯の宝物になった。心より感謝申し上げます。

予備検討会以降には、吉本一穂教授、翁嘉華准教授には新たな視点でご指導を頂く機会を持つことが出来た。吉本教授には、常にシンプルかつ客観的な物事のとらえ方を通じて、行き詰ったときに親切にご指導いただけたことによって、途中挫折する事なく最後までたどりつけた。厚く感謝申し上げます。また、翁准教授からは、本設計手法を成立させる核心的部分の考案において、多大なるご指導を賜った。本設計手法の中でも、サイクルタイムを算出するための先行関係をいかに作るか、という部分が設計手法を成立させるキーとなる部分であったが、翁准教授の豊富な知識から得られるアドバイスにより、新たな方法を考案する事が出来た。本当にありがとうございました。

また、小島史夫客員教授には、早稲田大学院に入学する以前から、テーマの相談と研究の在り方のご指導を頂くと共に、研究活動全般を通じて、学術的な意味合いと現実世界の中の生産システムを結び付けた上で、常に問題の本質を見抜き適切なるご指導を賜った。厚く御礼申し上げます。そして、上司の有馬浩二氏においては、非常に業務が忙しく研究を行う時間などとてもとれそうにない環境の中で、社会人が研究活動を行う価値を認めてもらおうと共に、暖かく見守って頂き後押しを頂いた。深く感謝申し上げます。

実際の研究活動においては、早稲田大学 重松氏には、計算アルゴリズムの検

討や実計算など、骨の折れる作業に対して、親身に協力頂いた。また（株）デンソーの加藤滋也氏、居谷道明氏においても、データ収集や分析、計算手法の確認など、多くの実作業において多大なる協力を頂いた。特に加藤氏においては、研究に行き詰ったときに常に議論の仲間として共に研究を行ってくれた事が当研究を成功に導くことが出来た大きな要因の1つになっている。皆様に心より御礼申し上げます。

さまざまな研究活動のサポートや手続き関係などに関しては、高田研究室の小林道子氏に大変お世話になった。この場を借りて御礼申し上げます。

また、毎月通う学校へのスケジュール調整や打ち合わせなど、多くの調整業務に関しては、秘書の岡野由季氏にお世話になり、影のサポート役として忘れてはならない存在であった。心より厚く御礼申し上げます。

最後に、2015年4月に早稲田大学に入学し、様々な人からご指導やサポートを頂きながら3年強、研究活動を続けてきたが、ウィークデーのみならず休みを利用して自宅でも相当の時間を費やして対応してきた中で、妻美樹の協力無くしては当研究を最後まで成し遂げることはできなかった。特に、予備審査直前という非常に難しい時期に父が他界し、一人残された一人暮らしの母の世話など、普段の生活が大変で、自分ひとりではどうしようも出来ない状況の中、自分に代わり母の面倒を見るなど、一人黙々と対応してもらった妻の姿には頭が下がる思いである。改めてここに感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] 緋田恵美. アジアのミレニアル世代とどう向き合うか.Mercer Japan. 2016-07-30.
- [2] マークラインズ,2016年の新興国最低賃金比較 -自動車生産 10カ国 12地域. マークラインズ.2016-01-15.
- [3] 経産省, モノづくり白書 17年度版
- [4] Abele, E., Liebeck, T., Worn, A., 2006, Measuring flexibility in investment decisions for manufacturing systems, CIRP Annals–Manufacturing Technology, 55/1: 433-440.
- [5] Colledani, M., Gyulai, D., Monostori, L., Urgo, M., Unglert, J., Van Houten, F., 2016, Design and management of reconfigurable assembly lines in the automotive industry, CIRP Annals-Manufacturing Technology 65/1: 441-446.
- [6] Erdin, M.E., Atmaca, A., 2015, Implementation of an overall design of a flexible manufacturing system, Procedia Technology, 19: 185–192.
- [7] F.W.Taylor, 1911, The Principle of Scientific Management, Hyper & Brothers
- [8] 日本経営工学会編, 1975, 経営工学便覧, 丸善
- [9] 精密工学会編, 1997, 生産システム便覧, コロナ社
- [10] 上田完次,村野朋光,渡辺寿也,小林元宏,柿花芳仁,岡部健,VAARIO J,1998,生物型生産システム 自己組織化生産システム,IMS 研究成果講演論文集,Vol.1998:pp.9-12
- [11] 近藤伸亮,佐藤ロベルト清,梅田靖,富山哲男,2003,細胞型機械の研究 (第三報), 精密工学会誌 Vol69 No12.pp17-1789
- [12] 藤井進,貝原俊也,藤本智子,2004,格子型機械配置生産システムにおける自律的レイアウト創生に関する研究,精密工学会 2004年度関西地方定期学術講演会講演論文集,(2004)61.
- [13] 杉村延広,SUYOTO,田中毅,1999,ホロニック生産システムのための工程設計システムに関する研究 (第1報,システムの基本構成と加工フィーチャの認識),日本機械学会論文集 (C編) Vol.65 No.633 pp395-400
- [14] 新井民夫,相山康道,2000,ホロニック生産システム,日本ロボット学会誌 Vol18 No.4 pp.477-480
- [15] Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., Van Brussel, H., 1999, Reconfigurable manufacturing systems, CIRP Annals–Manufacturing Technology, 48/2: 527–540.
- [16] The industrie4.0 working group, 2013, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0,

- [17] Akerman, M., Fast-Berglund, A., Karlsson, M., Stahre, J., Introducing customized ICT for operators in manufacturing, *Procedia CIRP*, Vol.41, 2016, pp.490-495.
- [18] 小島史夫, 2004, 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
- [19] 山崎康彦, 2001, 需要の変種変量に対応した生産システムの設計, IE レビュー, vol.42, No.5 (2001) p23
- [20] K. Sugito, S. Takata, S. Harashima, The Protean Production System as a Method for Improving Production System *Annals of the CIRP*
- [21] 寺田宏幸, 土屋総二郎, 日比均, 中齋龍美, 1999, 量変動対応型自動化生産システムの開発, デンソーテクニカルレビュー, vol.4, No.1,(1999) p20-23
- [22] James P Womack, Daniel T Jones, Daniel Roos, THE MACHINE THAT CHANGED THE WORLD, Productivity press (1990)
- [23] 大野耐一, トヨタ生産方式, ダイヤモンド社 (1978) pp38
- [24] Wallace J.H, Mark L.S, *Factory PHYSICS* third edition, (2011) p157-158
- [25] Monden, Y., *Toyota production system*, CRC Press, 2012.
- [26] 吉本一穂, 大成尚, 渡辺健, メソッドエンジニアリング, 朝倉書店 (2001) pp38
- [27] 井上達男 マテリアルハンドリングの将来と新しい価値の創造, システム/制御/情報, (2009) Vol. 53, No.2, pp 76-82
- [28] 黒田 充, 『ラインバランシングとその応用』, 日刊工業新聞社, 1984.
- [29] Kolberg, D., Zuhlke, D., 2015, Lean automation enabled by Industry 4.0 technology, *IFAC-PaperOnLine*, 48-3: 1870-1875.
- [30] Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation LIAA project homepage(Online), Available at <http://www.project-leanautomation.eu/>
- [31] 野地秩嘉, 2017, ノンフィクション連載 (第36回) からくりの精神, 日経ビジネス, No.1875, pp64-67
- [32] 大澤祐司, 2011, 減産ラインの生産性向上と改善できる人材の育成を目指し、アイデアを駆使した遊び心あふれる改善活動を展開, --デンソー 大安製作所 (特集 からくり改善活動の進め方と改善事例), 工場管理, Vol53, No15, pp15-21
- [33] 松永誠, 井下智司, 網谷茂, 大橋敏二郎, 量産工場における組立ロボット応用システム, 日立評論 VOL.65 No.12 (1983-12)
- [34] マテリアルハンドリング便覧, 日刊工業新聞社, 1987, p563-p565
- [35] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Professional, 1989
- [36] S.Takata, K Tsubouchi, Maximizing utilization rate of office automation equipment by intraoffice circulation, *CIRP Annals*, Volume 58, Issue 1, 2009, Pages 33-36

- [37] JiaHua Weng, Hisashi Onari, Operation Planning Based on a Genetic Algorithm for Multi-model Assembly Lines Considering Worker Change in Allocation, 2008, 日本経営工学会論文誌 / 59 卷 (2008) 4 号 p.304-311
- [38] Helgeson W.B., Birnie D.P., 1961, Assembly line balancing using the ranked positional weight technique, *Journal of Industrial Engineering*, 12/6, 334-338
- [39] Yang, S., 2008, Genetic algorithms with memory- and elitism-based immigrants in dynamic environments, *Evolutionary Computation*, 16, 3: 385-416.
- [40] Stark, Natalia, Minetti, Gabriela F., Salto, Carolina, 2012, A new strategy for adapting the mutation probability in genetic algorithms, CACIC 2012
- [41] Cobb, G.H., Grefenstette, J.J., 1993, Genetic algorithms for tracking changing environments, *ICGA 1993*: 523-530.
- [42] Hartigan, J. A., 1975, *Clustering Algorithms*, Wiley, New York.
- [43] Glover, Fred, 1989, Tabu Search-Part1, *ORSA Journal on Computing*1(2), 190-206
- [44] Glover, Fred, 1990, Tabu Search-Part2, *ORSA Journal on Computing*2(1), 4-32
- [45] Glover F, James P. Kelly, Manuel Laguna, 1995, Genetic algorithms and tabu search: Hybrids for optimization, *Computers & Operations Research*, Volume 22, Issue 1, January 1995, pp.111-134
- [46] Shigetoshi Noritake, Hiroshi Nakano, 1997, Comparison of Several Optimization Algorithms for Designing a Production Line, *Japan Industrial Management Association Vol47, No6*, pp 424-433
- [47] Gerald, R.A., John, R.O., Marc, J. S., 2004, U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study, *European Journal of Operational Research*, 156: 698-711.
- [48] John Miltenburg, 1998, Balancing U-lines in a multiple U-line facility, *European Journal of Operational Research* 109(1998)1-23
- [49] Fukushige, S., Inoue, Y., Tonoike, K., Umeda, Y., 2009, Design methodology for modularity based on life cycle scenario, *International Journal of Automation Technology*, 3, 1: 40-48.
- [50] Scholz-Reiter, B., Freitag, M., 2007, Autonomous processes in assembly systems, *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 56/2: 712–729.
- [51] Hu, S.J., Ko, J., Weyand, L., ElMaraghy, H.A., Lien, T.K., Koren, Y., Bley, H., Chryssolouris, G., Nast, N., Shpitalni, M., 2011, Assembling system design and operations for product variety, *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 60/2: 715–733.
- [52] Yamazaki, Y., Takata, S., Onari, H., Kojima, F., Kato, S., 2016, Lean automation system responding to the changing market, *Procedia CIRP*, 57: 201–206.
- [53] Yamazaki, Y., Shigematsu, K., Kojima, F., Kato S., Onari, H., Takata, S., Design

method of material handling systems for lean automation, CIRP Annals
Manufacturing Technology 66 (2017) 449-452

- [54] 山崎康彦, 重松研太, 翁嘉華, 小島史夫, 高田祥三, 2018, リーンオートメーションのためのマテリアルハンドリングシステム設計法, 日本機械学会論文集 Vol.84, No.862, 2018

研究業績

山崎 康彦

(2018年 12月 現在)

種 類 別	題名、発表・発行掲載誌名、発表・発行年月、連名者（申請者含む）
○査読付き論文	<p>【論文】</p> <p>Design method of material handling systems for lean automation—Integrating equipment for reducing wasted waiting time, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol.66/1, pp.449-452, 2017, Y. Yamazaki, K. Shigematsu, S. Kato, F. Kojima, S. Takata.</p>
○査読付き論文	<p>リーンオートメーションのためのマテリアルハンドリングシステム設計手法, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.862, 2018, 山崎康彦, 重松 研太, 翁 嘉華, 小島史夫, 高田祥三.</p>
○査読付き会議録	<p>Lean automation system responding to the changing market, Procedia CIRP, Vol.57, pp.201-206, 2016, Y. Yamazaki, S Takata, H. Onari, F. Kojima, S. Kato.</p>
査読付き会議録	<p>【その他】</p> <p>Development of 1/N machine for optimization of life cycle cost responding to globally varying production environment, Procedia CIRP, Vol.61, pp.22-27, 2017, Y. Yamazaki.</p>
総説	<p>Development of flexible manufacturing system, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26 (4), pp.426-433, 2014, Y. Yamazaki, K. Sugito, S. Tsuchiya.</p>
総説	<p>Development of revolutionary automation line for meter gauge, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26 (2), pp. 134-139, 2014, Y. Yamazaki, K. Fukaya, S. Tsuchiya.</p>
論文	<p>需要の変種変量に対応した生産システムの設計, IE レビュー, Vol.42, No.5, pp.23-29, 2001, 山崎康彦.</p>
講演	<p>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, 第 1 回ファクトリーオートメーション部門講演会論文集, 2001, 山崎康彦.</p>
講演	<p>脱低労務費依存・トレードオフ開発で高生産性を追求したグローバル競争で打ち勝つ自動車センサ用多種高速一貫生産システム, 生産システム部門講演会 2011 講演論文集, 2011, 森田裕之, 古橋正至, 山崎康彦, 北野晶之, 柘植広行, 石畝学.</p>
講演	<p>IoT 時代におけるモノづくり革新, 国際生産工学アカデミー第 68 回総会併設市民公開講座.</p>

