

食品製造におけるスマートファクトリー構築  
に関する研究

2020年度

松本卓夫

学位論文 博士（工学）

食品製造におけるスマートファクトリー構築  
に関する研究

2020 年度

慶應義塾大学大学院 理工学研究科

開放環境科学専攻

松本 卓夫

指導教員 松川 弘明 教授

# 論文要旨

インダストリー4.0 の概念が提唱され、IT 先端技術の開発は著しく進化してきている。その中で巨大 IT 関連企業 G A F A (Google、Apple、Facebook、Amazon) が消費者市場で発展を続けている。

これに対して製造業では、インダストリー4.0 の概念を具現化させるスマートファクトリーの構築が注目され、多くの研究が行われているが、いずれもスマートファクトリーの構築に貢献するためのコンポーネントや、通信技術、AI 技術、ロボティクス技術等固有技術に関するものが多く、具体的なスマートファクトリー構築の事例は少ない。スマートファクトリー構築とその活用には、ツールである IT 技術を実際の工場を稼働させるための OT (Operation Technology) に融合させることが非常に重要である。本研究では、日本の食品業界に焦点を当て、まず日本の食品業界の現状をサプライチェーンの視点から調査分析した。その内容は、食品ロス低減対策のための、食品の日付別管理、納品ルール、サプライチェーン効率化、食品の安全確保のためのトレーサビリティ等である。

次に、スマートファクトリーの構築と運用においては、調達と販売を含めてサプライチェーンを効率的に運用することが不可欠であるために、特にスマート化と係りが深い需要分析、及び生産計画作成のアルゴリズムについて事例分析を行った。また、大手乳業会社の新工場と物流センター建設を事例として、スマートファクトリー構築のグランドデザインの方法論を提案し、効果分析を行った。

本研究の提案モデルは、スマートファクトリーに向けた、食品工場における最適製造ライン設計問題と工場システムにおける水平階層型システムモデルの2つである。

具体的には、最適製造ライン設計モデルについてプロセスチーズ工場の設備投資問題の事例をもとに、連続した2工程間の設備投資最適化モデルを構築し、設備投資後の運用費用も考慮して初期の最適設備投資問題及び最適設備運用問題の定式化を行い、実用的な解法アルゴリズムを開発した。このモデルの特徴は、設備投資費用だけでなく、運用費用として2工程間の設備能力の同期化費用及び需要変動に追随するための稼働費用(柔軟性費用)を考慮して設備投資の意思決定を行うことである。

スマートファクトリー構築のグランドデザインの方法論では、水平階層型システムモデルを中心に、従来の製造ごとに分かれた垂直型システムモデルの短所を克服できるように、製造工程を5つの水平方向に区分し各水平階層の機能を標準化するシステムモデルを提案した。このシステムモデルでは、システムの接続性が標準化され、拡張と運用の切り替えが容易になる特徴がある。また、各システム機能がモ

ジュール化できるので、横展開が容易になる。そのためOTの標準化が容易になり、新工場建設及び増設における効率が飛躍的に向上し、インダストリー4.0 の概念である水平・垂直統合に大きく貢献できる。提案した方法論については、操作機能と可視化機能、ノウハウの蓄積と活用、トレーサビリティ確保、ロボット管理機能、ITとOT及びITとMTの融合機能及びサイバー・フィジカルの階層による区分について、事例を用いて有効性に関する検証を行った。そして、大手乳業メーカーY社のヨーグルトとデザート製造工場のシステム導入・更新時の工数と費用等について比較を行い、総じて30～50%の費用が削減できることを確認した。

キーワード：スマートファクトリー，製造ライン設計，オペレーションテクノロジー，工場管理システム，制御システム，食品工場

# Abstract

## Research on building smart factories in food manufacturing industry

The concept of Industry 4.0 has been advocated, and the development of advanced IT technology has evolved significantly. Among them, the giant IT-related company (GAFA) continues to develop in the consumer market.

On the other hand, in the manufacturing industry, attention has been paid to the construction of smart factories that embody the concept of Industry 4.0, and much research has been conducted. However, most of them are related to IT technology such as components for contributing to smart factories, communication technology, AI utilization, robotics technology, etc., and there are few concrete examples of smart factory construction. In order to build a smart factory and utilize it, it is very important to integrate IT technology, which is a tool, with the OT (Operation Technology) for operating an actual factory.

In this study, we focused on the Japanese food industry, and first investigated and analyzed the current state of the Japanese food industry from the perspective of the supply chain. The contents include food date management and delivery rules for food loss reduction measures, supply chain efficiency, and traceability for ensuring food safety.

Next, in order to build and operate a smart factory, it is indispensable that the SCM system is built and operated efficiently. In particular, we conducted case analysis on demand analysis and production planning, which are closely related to smart factories, and created the algorithm. After that, we analyzed the grand design and effects of smart factory construction, taking the construction of a new factory and distribution center of a major dairy company as an example.

There are two models proposed in this study: the optimal equipment placement problem in food factories and the horizontal hierarchical system model in factory systems for smart factories. The optimal equipment placement problem is a case study of the equipment placement problem in a processed cheese factory. In this case study, we created a model and solution for the problem of optimizing the equipment capacity and the number of installed units between two consecutive processes, and optimizing the number of operating units for each period according to demand. The

feature of this model is that the line operation cost is not only the equipment average investment cost and the operation cost, but also the loss cost caused by the equipment capacity difference between the two processes which we call the synchronization cost, and the cost caused by the equipment capacity difference with respect to the demand fluctuation which we call the flexible cost. As a result, it was possible to invest in proper equipment which can minimize operating cost throughout the product lifecycle and can minimize operating costs after investment.

Next, a horizontal-hierarchical system model is proposed which is the system configuration and operation model of the entire factory. This system model is not a vertical system model that is conventionally divided for each product and manufacturing area, but a system model that divides each manufacturing process into five horizontal directions and standardizes the functions of each horizontal-hierarchy. This model standardizes system connectivity and improves scalability. In addition, each system function can be modularized, facilitating horizontal deployment.

Therefore, standardization of OT becomes easy, and new factory construction and expansion can be carried out efficiently. Therefore, it is a system model that greatly contributes to horizontal and vertical integration, which is the concept of Industry 4.0. In this research, we propose the system configuration and functions of each horizontal layer, and evaluate the model as an operation function and a visualization function, accumulation and utilization of know-how, traceability assurance, robot management function, IT and OT fusion function.

The classification by the hierarchy of cyber and physical system was carried out. Then, we numerically verified the effectiveness of the proposed system model. As an evaluation, we compared the man-hours and costs for introducing and updating the system at a yogurt and dessert manufacturing factories in a Japanese company, with the reduction of 30 to 50% cost reduction applying the proposed system design methods.

# 目次

第 1 章 序 章 .....	1
1. 1 研 究 背 景 .....	1
1. 2 本研究の目的 .....	2
1. 3 S C M視点でのスマート化に向けた食品産業の特徴 .....	7
1. 3. 1 製品の分類 .....	7
1. 3. 2 食品の日付別管理 .....	10
1. 3. 3 食品ロスの実態と対応 .....	11
1. 3. 4 食品の物流方式と対応 .....	16
1. 3. 5 食品安全性のためのトレーサビリティの確保 .....	20
1. 3. 6 食品産業における効率化の取組事例 .....	29
1. 3. 7 主要製造業の設備投資状況 .....	35
1. 4 本論文の構成 .....	39
第 2 章 既存研究と事例 .....	40
2. 1 はじめに .....	40
2. 2 文献レビュー .....	41
2. 2. 1 インダストリー 4. 0 .....	41
2. 2. 2 スマートファクトリー .....	44
2. 2. 3 インテリジェント テクノロジー .....	49
2. 3 需要分析（事例分析） .....	54
2. 3. 1 製品需要の傾向分析 .....	54
2. 3. 2 販売量評価のマトリクス分析 .....	58
2. 3. 3 販売計画誤差評価のマトリクス分析 .....	60
2. 4 生産計画の作成（事例分析） .....	62
2. 4. 1 保有在庫日数の算出 .....	63
2. 4. 2 生産計画立案の流れ .....	66
2. 4. 3 出荷要求量と生産要求量の算出方法 .....	66
2. 4. 4 生産計画数量の作成方法 .....	70
2. 5 サプライチェーン視点のスマートファクトリーグランドデザイン .....	76
2. 5. 1 プロセスチーズのサプライチェーン .....	76
2. 5. 2 新事業所のグランドデザイン基本方針 .....	77
2. 5. 3 新工場・総合物流センターのグランドデザイン .....	78
2. 5. 4 新事業所（新工場・総合物流センター）の概要 .....	80

2. 5. 5	スマート化による効果 .....	81
2. 6	事例分析のまとめ .....	83
第 3 章	プロセスチーズ工場における連続した 2 工程間ライン設計問題に関する研究.....	86
3. 1	はじめに .....	86
3. 1. 1	本章の概略 .....	86
3. 1. 2	プロセスチーズの製造工程 .....	87
3. 2	既存研究 .....	92
3. 3	提案モデル .....	95
3. 4	解法と数値実験 .....	98
3. 4. 1	解 法 .....	98
3. 4. 2	数値実験 .....	100
3. 5	Y社の現状ラインの評価（事例研究） .....	103
3. 6	本章研究の結論 .....	106
第 4 章	食品工場における水平階層型システムモデルの研究（プロセスチーズ製造での事例研究）.....	108
4. 1	はじめに .....	108
4. 1. 1	本章の概略 .....	108
4. 1. 2	プロセスチーズ製造でのシステム化の留意点 .....	110
4. 1. 3	食品工場の区分 .....	112
4. 1. 4	垂直型システムモデルの問題点 .....	113
4. 2	既存研究（文献レビュー） .....	115
4. 2. 1	ISA 95 システムモデルとデータ連携 .....	116
4. 2. 2	制御システム（PLC、DCS、MES） .....	117
4. 2. 3	文献レビューと本研究との関係 .....	122
4. 3	提案システムモデル .....	123
4. 3. 1	第 1 階層：個別設備制御階層 .....	124
4. 3. 2	第 2 階層：エリア内ネットワーク階層（計装ネットワーク） .....	127
4. 3. 3	第 3 階層：制御サーバー階層 .....	129
4. 3. 4	第 4 階層：製造管理階層（MES、WMS） .....	131
4. 3. 5	第 5 階層：全社ネットワーク階層 .....	133
4. 4	提案システムモデルの機能評価 .....	134
4. 4. 1	各階層の UI と操作機能及び見える化機能 .....	134
4. 4. 2	蓄積されるノウハウ .....	136
4. 4. 3	トレーサビリティの確保 .....	137

4. 4. 4	ロボット管理制御 .....	138
4. 4. 5	各階層のデータレベルとOT・IT、MT・ITの対応 .....	139
4. 4. 6	サイバーとフィジカルの階層別区分 .....	140
4. 4. 7	全体の評価 .....	141
4. 5	水平階層型システムの優位性の検証 .....	142
4. 5. 1	システム構成の作成費用 .....	142
4. 5. 2	制御方案設計費用 .....	142
4. 5. 3	基本ソフトウェア費用 .....	143
4. 5. 4	新設ハードウェア費用 .....	143
4. 5. 5	システムインフラとネットワーク費用 .....	144
4. 5. 6	制御プログラム作成費用 .....	144
4. 5. 7	教育費用 .....	145
4. 5. 8	システム保守費用 .....	146
4. 5. 9	システム更新の数値検証 .....	146
4. 5. 10	数値検証の計算根拠 .....	147
4. 6	本章のまとめ .....	151
第 5 章	結論と将来の展望 .....	154
参 考 文 献	.....	159
謝 辞	.....	173

# 第 1 章 序 章

## 1. 1 研 究 背 景

日本では、少子高齢化が進行しており、人件費の高騰と労働力不足のために、製造業は、依然として低迷している。特に、地方の郡部では人口減少と高齢化が激しく、製造工場の稼働に大きく影響している。東京商工会議所の調査によると、2018年に消滅した企業数は400(28.6%)増加し、2013年以来最も厳しい年と考えられている。労働力不足の主な理由は2つ挙げられる。1つは、1日中繰り返し作業をするような生産ラインの労働は若者にとって魅力的ではないということである。そして、もう1つは、開発、設計、製造能力を有する上級の技術者が不足していることである。

そして、生産形態もいわゆる「チェーン反転」により、供給ベースのアプローチから消費者の要求に対応していく需要ベースのアプローチに変わってきている[1][2]。高品質で差別化された製品に対する消費者の需要が高まるにつれて、製造業は多品種でバラエティー化された個別製品を提供する必要がある。その結果、工場は、サプライチェーンの迅速な対応、正確なデータ追跡、柔軟な生産、システム間の連携制御を考慮して、生産効率を向上させ、生産コストを削減する必要がある。従って、設備、製造システム、ユーティリティなどの要素は、情報を共有できるだけでなく、相互に自律的に統合制御できる必要がある[3]。

更に、近年、消費者市場では GAF(A (Google, Apple, Facebook, Amazon)や BAT (Baidu, Alibaba, Tencent) のような超巨大企業が誕生し、破壊的なイノベーションが起きている。それに対して、生産者側では インダストリー4.0[4]に代表される第4次産業革命[5]が注目されており、その概念を具現化する中核にスマートファクトリーがある。しかし、インダストリー4.0 はスマート化の概念を提案したに過ぎず、具体的なシステム構成や運営については不明な点が多い[6]。

多くの研究は、管理科学と生産経済学の理論に裏付けられた自動機械、ロボット、その他のIT (Information Technology) の活用などの新しい技術の開発を提案している。その中で、韓国とスウェーデンの企業例を紹介して、スマートファクトリー概念を説明している事例がある。この事例では、先進的な工場運用のために CPS (Cyber-Physical System) を備えたスマートファクトリーの構造と、多様な顧

客要求に対応するための FaaS (Function as a Service) の概念を述べている[7]。そして、リアルタイムのデータ収集と統合のために IoT フレームワークが提案されている。この提案は、生産決定を最適化するために、企業、工場の製造現場、設備などの様々な運用階層での情報の可視性を高めることを目的としている[8]。

ただし、現在のスマートファクトリー推進活動、国家プロジェクト、及び新しい生産システムを開発する試みは、多くの優れた企業によって提案され蓄積された技術による運用実績をベースとしたものである。また、スマートファクトリーに関するほとんどの研究は定性的であり、詳細な定量分析が欠けている。よって、ほとんどのスマート化への移行手法の構築は、まだ新しい課題であり初期段階にある[9]。

インダストリー4.0 を実現したいこれらの企業は、大企業の経験を効果的に自社の案件に適用する方法を策定する必要がある。そして、インダストリー4.0 を戦略に取り組む企業は、自社の能力、製品、顧客、その他の利害関係者に基づいて詳細な取組範囲を指定する必要がある。さらに、インダストリー4.0 のアーキテクチャを実装するには多くの実際的な問題があり現状困難になっている。

そのため、製造業は、導入効果が潜在的であり、得られる利益が不明確なためこれらの新しい技術やコンポーネントを実装する明確なプラント設計と、その建設に必要なと思われる大規模な投資に消極的になっている[10]。

製造工場では、様々な時代にその時に応じた様々な技術に基づいたデバイスを使用してきたため、既存デバイスの改良は、スマートファクトリーに対応するシステム統合を簡素化するための、特に重要な側面である。しかし、現状この側面に対する課題解決が充分でないということは、既存のスマート製造システムが製造工場で普及されないもう1つの要因である[11]。

以上、スマートファクトリーの構築は製造業に求められているが、その具現化技術が明確になっておらず、早急に推進すべき課題である。

## 1. 2 本研究の目的

インダストリー4.0 の概念を具現化する事例として、スマートファクトリーの構築はその中核である。しかし、現在までの研究及び企業実績ではスマートファクトリーの具体的な構築事例を提示したものはほとんどない。

コロナの影響で今後のサプライチェーンはドメスティックでの確保に動いていくことが必要になると考える。そのためには、労働力の確保が困難な日本等ではサプライチェーンのスマート化を早急に強固に推進しなければならない。

Ian Bremmer 氏は朝日新聞のインタビューに対して、経済活動は世界に広がるグローバル展開から消費者に近いローカルなものに移行していく。そして、人の作業がなくても済む自動化も進み、世界の経済人が将来の物として予想していた第4次産業革命が一気に到来するであろうと提言している（朝日新聞,pp4,2000/4/27）。

本研究では、図1-1に示しているように、スマートファクトリー構築のステップを、グランドデザイン、個別デザイン、運用システム、S C M(Supply Chain Management)との連携により構成されるものとする。

S C Mの定義は、米国のサプライチェーンカウンシルによると、「価値提供活動の初めから終わりまで、つまり原材料の供給者から最終需要者に至る全過程の個々の業務プロセスを、一つのビジネスプロセスとして捉え直し、企業や組織の壁を越えてプロセスの全体最適化を継続的に行い、製品・サービスの顧客付加価値を高め、企業に高収益をもたらす戦略的な経営管理手法」としている。

本研究でのS C Mとは、「製造業を中心にして、サプライチェーン上で連携すべき、川上の原材料提供企業、川下の卸業、流通業と業務連携及び情報連携することにより、以上のサプライチェーンを効率化し全体最適を実現するもの」を言う。そして、そのための業務モデルをS C M業務モデルとし、連携したS C M業務モデルをシステム化したものをS C Mシステムとする。また本論文では、S C M業務モデルとS C Mシステムを含めてS C Mと呼ぶこととする。

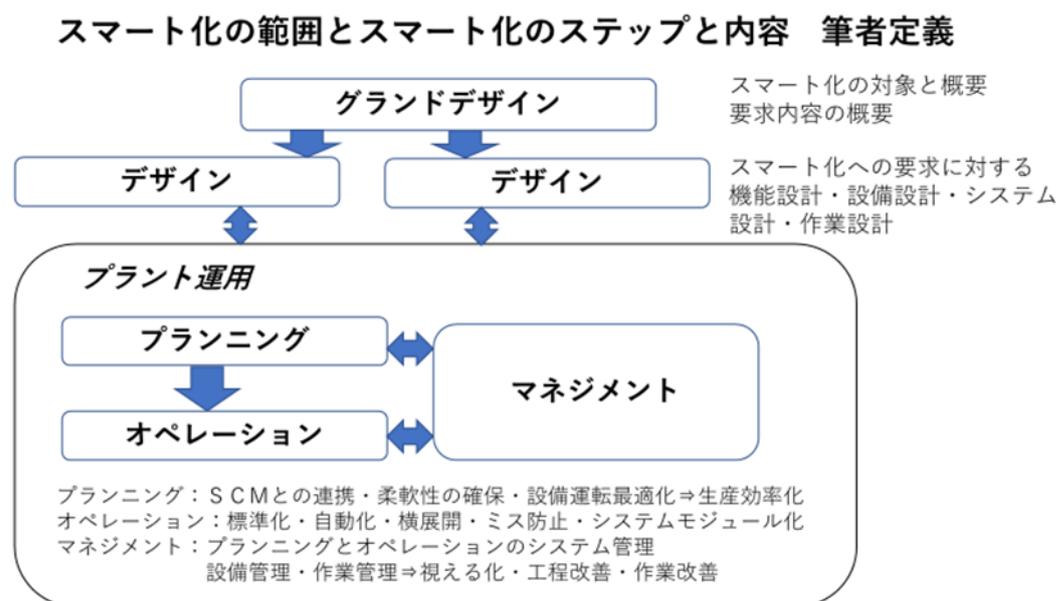


図 1-1 スマートファクトリー構築のステップ概念

また、スマートファクトリーの一般的な定義は明確化されていない。経済産業省が作成したスマートファクトリーのロードマップによると、(1)品質の向上、(2)コストの削減、(3)生産性の向上、(4)製品化・量産化の時間短縮、(5)人材不足・育成の対応、(6)新たな付加価値の提供・提供価値の向上、(7)リスク管理の強化の7点を挙げている。そして、これらを達成するために、IoT、AI、ビッグデータ等の先端IT技術の導入、ネットワークの最適化、センサーやロボットによる自動化を推進することとしている。また、スマート化のステップとして、レベル1：情報の収集・蓄積、レベル2：データによる分析・予測、レベル3：データによる制御としている。

そして、既存研究でのスマートファクトリーの定義も明確化はされておらず、一般的な定義としてまとめてみると以下ようになる。

#### (1) 一般的なスマートファクトリーの定義

スマートファクトリーとはインダストリー4.0 の概念を具現化し、先端テクノロジーを導入した先進的な工場である。つまり、一般的にデジタルデータを活用して業務プロセスの改革、品質・生産性の向上を継続発展的に実現する工場である。具体的には、生産に対する需要変動、資源の供給変動等、外部環境の変化に対して変動する生産条件に対応して、ITや統合ネットワーク、ロボティクス、AI解析を活用して、生産活動の問題を柔軟かつ迅速に解決する適応力のある生産プロセスを提供するソリューションである。そして、以下のコンポーネントを備えている工場である。

- ① 統合ネットワーク：搬送機器、要求資材、設備はセンサーやデバイスにより、一貫性を持ち連携をとることができ、工場での流れを可視化することができる。
- ② 自動化設備：ロボティクスの活用により、負荷のかかる作業を自動化する。
- ③ モビリティとセンサー：モバイル端末や小型軽量化されたデバイス、センサーにより生産状況をリアルタイムに把握し、システムによる設備診断、保守に新たな次元を提供する。
- ④ 柔軟性：自動化された工程の運用はシステムにより高い生産柔軟性を持つ。システム導入や設備診断は、ユーザーがサイバーからモジュールを選択し最適なものを活用できる。
- ⑤ 顧客対応：顧客の個々のニーズに合わせて、工場で製品をカスタマイズし提供できる。
- ⑥ モジュール化：設備構成、システム、製品構成がモジュール化されており、モジュールの組合せで製品を特定の要件に適合したものにできる。

本研究では、以上のスマートファクトリーの一般的な機能に対して、対象としている食品工場の特殊性として、以下のような特徴があることを述べ、一般的な定義の機能の中から食品工場の特殊性に対して適合し、効果が大きいものは、外部環境に対する生産柔軟性であるとし、さらに一般的な定義の機能を応用した食品製造のOTとMTの標準化とシステム化による生産性と品質確保を加えて、食品工場のスマート化を定義する。

## (2) 食品工場の特殊性と特徴

- ① ディスクリート型とプロセス型生産が混在し、製造ラインは分岐集合を繰り返す。そのため、工程により自動化と労働集約型が混在している。
- ② 1ラインで複数品種を生産し、製品は日付別管理が必要である。そして、生産リードタイムは1~3日程度が通常であり、需要の季節変動や製品による需要変動が違っている。そのため、生産変動が大きくなりロスが発生し易い。
- ③ 通常使用する原材料の成分、規格は同一ではなく、ロットごとに変動している。
- ④ 機械製造等の精密加工と違い成分規格と衛生性を確保した上で、製品評価は官能評価によることが大きい。そのためセンサーによる製品測定が難しい。
- ⑤ 物性コントロールにより品質、歩留まりに大きな影響が出る。

以上により、製造パラメータ・作業方法は工程内で製造中に判断し変更及び調整をする必要がある。よって、製造は熟練が求められOT (Operation Technology) の標準化とモジュール化が難しいため先端技術の導入が遅れている傾向がある。」

## (3) 食品工場のスマートファクトリーの定義

以上の特徴を踏まえて、本研究では食品工場のスマート化を以下の3つの基準を用いて定義する。

- ① 外部環境への対応として、特に需要変動（多品種生産・製品の改廃等）に柔軟迅速に対応しコスト最適化をできる機能を持った製造ラインとシステムを有している。
- ② 生産条件の変動対応として、特に調達する原材料の変動に対して最適な配合、制御パラメータ設定を行い品質及び歩留まりを確保するためのOTとMT (Management Technology) が標準化されている。
- ③ 経験による熟練者に依存している熟練作業を最適な標準化をして、未熟練者でも短期間の教育でミスがなく稼働、品質を保証できるようになっている。

そして、これらの基準をクリアするために、OTとIT、MTとITを統合することにより、設備とIT及びMT、ロボットとIT及びMT、人とIT及びMTの統合を実現し、ラインのブロック化とモジュール体系化することで、プランニングとオペレーションが同期し適切にマネジメントされており、そしてこれらは持続発

展性を持ち、モジュールの組合せによる水平垂直統合と横展開を短時間で容易にできる機能を有するものである。

#### (4) 研究目的

以上の中で、日本の大手乳業会社における、工場建設と運用の事例を基にして、スマートファクトリーと連携すべきSCMの事例分析を述べる。そして、スマート化に貢献できる製造ライン設計モデルの提案とスマートファクトリーが提唱している、水平垂直統合と水平展開等を実現するための、食品工場におけるシステム構成の設計と運用の提案をする。

本研究の第1の目的は、サプライチェーンがSCMの構築により、業務モデルが標準化され、システム化によりサプライチェーンの効率化が達成されており、サプライチェーン間の連携ができていているという前提で、スマートファクトリー設計をし、運用することである。その中で、特に重要なSCMの機能である需要分析及び生産計画の基本的なアルゴリズムを事例分析として述べ、スマートファクトリーのグラウンドデザインの事例を分析することとする。

次に第2の目的として、以上のサプライチェーン間の連携を前提として、スマートファクトリーの具体的な構築のための工場の製造ライン設計モデルを提案する。このモデルでは独立している連続した2工程において、設備能力の同期化と需要変動に対する柔軟性を考慮した、設備投資の最適化と各期の運用最適化を求めるモデル式と解法アルゴリズムを提案する。そして、数値検証によってそのモデルの有効性を検証する。

第3の目的としては、食品工場におけるスマートファクトリーを構築、運用するための、食品工場に適合した製造システムの全体的な設計基準として、水平階層型システムの導入を提案する。そして、このシステムモデルにおける具体的な各システム階層でのシステム運用と構成機器、ネットワーク構成を示し、水平階層型システムの評価と効果を述べ、このシステムモデルがOT及びMTとITを統合させ、インダストリー4.0やスマートファクトリーが提唱している、水平垂直統合、システムの標準化、製造ノウハウと制御ソフトウェアの水平展開、効率的な製造運用、トレーサビリティの確保等の機能を有し、スマートファクトリー構築に大きく貢献できるものであることを検証する。

以上、スマートファクトリー構築と運用を実現するために、食品工場の事例研究を用いて実用的なモデルを提案することを本研究の目的とする。

## 1. 3 SCM視点でのスマート化に向けた食品産業の特徴

### 1. 3. 1 製品の分類

食品は大きく以下のように分類されている。

#### (1) 生鮮食料品

野菜、鮮魚等製造加工がなされないで、流通出荷される食品群であり、今回の研究対象である加工食品とは別のものであるため、本研究テーマには含まないものとする。

#### (2) 日配型製品

日配型製品とは、牛乳を代表とする基本的には毎日店舗に配送する製品群である。鮮度維持の管理方法として、品質保証の観点から全世界的に設定されている賞味期限または消費期限（日本では1995年より採用）は[12]、7日から20日程度のものがほとんどを占めており、製造業からの出荷基準は、在庫型製品群のいわゆる3分の1ルールには該当しないことが多く（次項にて解説）、乳製品の場合このカテゴリーは市乳類と分類されている（牛乳・乳飲料・ヨーグルト類・プリン等デザート類）。市乳類の出荷は、製造後1日から3日以内とされていることがほとんどである。

そのため、生産工場から出荷先までのリードタイムが短いことが特徴となっており、乳業各社は販売地域に対して翌日までに配送可能な場所に生産拠点を有していることが多い。近年は道路網の整備が進んだため、生産工場の施設を物流配送センターとしての機能に転換することが進んできており、生産集約による効率化をめざしている。

雪印メグミルクでは、2013年に海老名工場（神奈川県）を建設し、富里工場（千葉県）、日野工場（東京都）、児玉工場（埼玉県）を閉鎖し、生産体制の整備を実施している。また東日本では、以前の生産工場であった新潟・金沢・静岡・仙台・岩手・青森を2000年以降順次閉鎖し、物流配送センターを設置して、生産・物流体制を構築した [13]。

生産工場の生産能力設定は、基本的には製品の在庫期間が持てないため、最高需要に対応できる設備能力を有することが求められる。

製品の物流経路は、以下のようになっている。

- ① 生産工場 → → 流通業
- ② 生産工場 → 他生産工場 → 物流配送センター → 流通業
- ③ 生産工場 → → 物流配送センター → 流通業

物流配送センターを経由する場合は、出荷までに2日以上を要する。

以上の物流経路と、出荷期限制約のため、各生産工場の日々の生産量決定は担当各地域の需要見込みから、見込量生産をしないと出荷制約を遵守することができない。また、牛乳等の飲料は、販売当日の天候及び気温に大きく左右されるため、生産量決定に多くの労力を投入している現状がある。そして、製品在庫を持つことができないため、欠品と廃棄リスクの回避の意識が大きくなり、ブルウィップ効果[14]が発生しやすいカテゴリーである。ブルウィップ効果の対応については[15][16][17]等で研究発表されている。

### (3) 在庫型製品

在庫型製品は、大きく3種別に分類することができる。

- ① 賞味期限 20 日から 60 日程度の製品(フレッシュナチュラルチーズ等) 製品表示は賞味期限 年・月・日
- ② 賞味期限 120 日から 360 日の製品(プロセスチーズ、マーガリン、バター等)、製品表示は賞味期限 年・月・日
- ③ 賞味期限 360 日以上の製品、製品表示は賞味期限 年・月で日の表示をしない場合が多い。

法定では、賞味期限が3か月以上の製品は年月表示が認められている。アイスクリーム類では、賞味期限表示をしていない。

以上のような在庫型製品の出荷基準は日配型製品と違い、生産後製造業管理の倉庫で在庫され、通常賞味期限の3分の1の期限以内に卸業に出荷される。(いわゆる3分の1ルール、このルールについては後述)。

在庫型製品では、販売計画・生産計画・物流輸配送計画・在庫計画等のSCM(Supply Chain Management)の導入が進んでいるカテゴリーである。製品在庫から出荷でき、卸業も在庫を持っているため、日配型製品の地域分散生産方式よりは、集約拠点生産方式の方が適していると言える。在庫型製品の生産物流拠点として、雪印メグミルクでは総合物流センターを隣接した、加工乳製品(プロセスチーズ・マーガリン類)の統合工場を茨城県阿見町に建設し、阿見工場・阿見総合物流センターとして2014年に全面稼働した[18][19][20]。

当工場は、プロセスチーズ工場の横浜工場(横浜市)、関西チーズ工場(伊丹市)及びマーガリン工場の厚木マーガリン工場(海老名市)を閉鎖集約した統合工場である。また、当工場の特色は生産工場と製造業(雪印メグミルク)管理の在庫拠点を隣接し一体化していること、原料在庫拠点も同様に工場と一体化し、サプライチェーンの効率化を達成していることである。

在庫型製品の生産能力と生産方式は、日配製品とは違い出荷制限約が長く、保有在庫から出荷する方式であるため、年間の総需要量を工場年間生産能力でまかなえればよく、日配型製品のように日別、週間別の需要に生産能力が対応できなくてもよい。つまり、季節変動が大きい製品の場合、最大月の需要量が総生産能力を上回っていても、賞味期限3分の1ルールの出荷期限の範囲であれば、前倒し生産を実施し、適正な在庫計画のもとに在庫管理を実施している。

よって、在庫型製品では生産工場のライン設備能力の設定が重要となり、工場の生産性と収益に影響をおよぼすことになる。本研究では第3章に「プロセスチーズ工場における連続した2工程ライン設計問題に関する研究」として、設備能力と設置台数及びライン運用の最適化研究を提案している。

#### (4) 日配製品と在庫型製品のスマート化のポイント

日配型製品のスマート化のポイントは、流通業と製造業の情報連携を強化し的確な日々の生産計画と販売量の変化に対応した生産変更を可能にすることである。また、製造業は自工場の販売範囲の需要が生産能力を超えていないかを常態監視し、他工場との生産連携による生産応援体制を構築しておく必要がある。

そして、設備トラブルによるラインの稼働停止は欠品に直結してしまうため、設備の稼働状態監視、設備の状態解析をIoT技術等を活用してシステム化し、故障の事前予知を可能にし、常に予防保全ができる工程管理体制を構築することが有効である。そして、生産稼働の低下で予定生産量を確保できない場合も想定して他工場との生産連携を考慮することが必要である。そのために、連携を想定している複数工場の生産計画の共有化と生産状況のリアルタイムの把握を一つのグループとして策定できるようにしておくことが重要である。

在庫型製品のスマート化のポイントは、日配型とは違い、製造業管理の在庫拠点からの出荷となるため、SCMにより、需要予測、生産計画、在庫管理を標準化して、製品在庫計画と販売計画をコントロールできるようにし、効率的な生産計画の立案と生産実績管理をシステム化することにより、需要変動に対応できる工場設計と工場の運用管理をすることが重要である。

また、賞味期限が長いため、トレーサビリティ情報の確保と異常品発生時、使用原材料の異常が発覚した場合、設備トラブルによる製品不良の可能性のある場合等の対応を迅速にするために、システムに各データを履歴として記録しておくことにより、工場運用のブラッシュアップを計り、より安定稼働ができるようにしていくことも重要なポイントである。

## 1. 3. 2 食品の日付別管理

### (1) 製品の日付表示内容

食品は前述の通り、安全性の確保の目的から賞味期限の表示が義務付けられている。日配型製品、在庫型製品ともに年月日表示をしているが、賞味期限が3か月以上のものは年月表示でも許可されている（缶詰製品等）。以前は賞味期限日ではなく製造年月日表示をしていたが、1995年より賞味期限表示に変更になった。よって、購入する消費者は製造年月日がわからない。製造年月日からの賞味期限の日数設定は製造業の責任において、製造業が任意に設定している。牛乳を例にとると同一の賞味期限表示の製品であっても製造業や製品名の違いで製造年月日は同一でない場合がある。

食品期限表示の設定について、厚生労働省と農林水産省は2005年2月にガイドラインを発表している[21]。本ガイドラインによると、期限の設定は、食品の特性等に応じて、微生物試験や理化学試験及び官能検査の結果等に基づき、科学的・合理的に行うものであること、食品に表示される「賞味期限」等の期限は、その食品の品質保持に関する情報を把握する立場にあり、当該製品に責任を負う製造業者等が科学的、合理的根拠をもって適正に設定すべきものであると示されている。

期限表示設定の基本的な考え方は、以下の通りである。

#### ① 食品の特性に配慮した客観的な項目（指標）の設定

期限表示が必要な食品は、生鮮食品から加工食品までその対象が多岐にわたるため、個々の食品の特性に十分配慮した上で、食品の安全性や品質等を的確に評価するための客観的な項目（指標）に基づき、期限を設定する必要がある。客観的な項目（指標）とは、「理化学試験」、「微生物試験」等において数値化することが可能な項目（指標）のことである。

#### ② 食品の特性に応じた「安全係数」の設定

食品の特性に応じ、設定された期限に対して1未満の係数（安全係数）をかけて、客観的な項目（指標）において得られた期限よりも短い期間を設定することが基本である。なお、設定された期間については、時間単位で設定することも可能であると考えられることから、結果として安全係数をかける前と後の期限が同一日になることもある。

#### ③ 特性が類似している食品に関する期限の設定

本来、個々の食品ごとに試験・検査を行い、科学的・合理的に期限を設定すべきであるが、商品アイテムが膨大であること、商品サイクルが早いといった食品を取り巻く現状を考慮すると、個々の食品ごとに試験・検査をすることは現実的でない

と考えられる。食品の特性等を十分に考慮した上で、その特性が類似している食品の試験・検査結果等を参考にすることにより、期限を設定することも可能であると考えられる。

#### ④ 情報の提供

期限表示を行う製造者等は、期限設定の設定根拠に関する資料等を整備・保管し、消費者等から求められたときには情報提供するよう努めるべきである。

以上が、期限設定のガイドラインによる基本的な指針である。ただし、乳製品の中には、保存状態において品質上問題がないとして、アイスクリーム類には賞味期限を設定していない。食品には賞味期限日付の表示以外にも、表示を義務付けられているものがあり[22]、工場ラインを設計する際には、表示の方式（納品資材に表示、ライン内で表示内容を印字等）、そして正しく表示項目が製品になされているかの検査工程の設定が重要となる。

### 1. 3. 3 食品ロスの実態と対応

#### (1) 食品ロスの実態

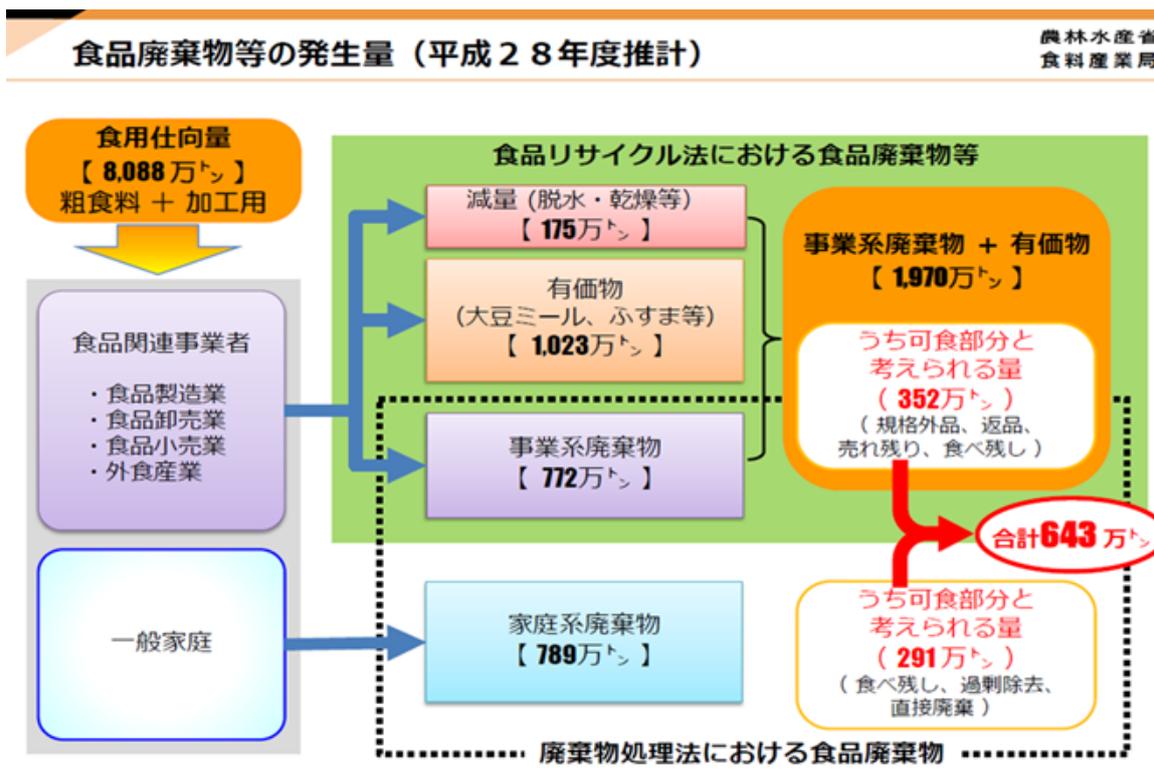


図1-2 食品廃棄物等の発生量

図1-2の通り、食品廃棄物は可食分で年間643万トン発生しており、食品関連事業者が352万トン、家庭系が291万トンとなっている。

製造業と流通業に分けて食品ロスの発生要因を集計した結果は、製造業では、「製造工程でのロス」や「規格外商品」が多く、流通業では、「期限切れ」、「包装材料の損傷」、「過剰在庫」等の要因が多いことが解った。

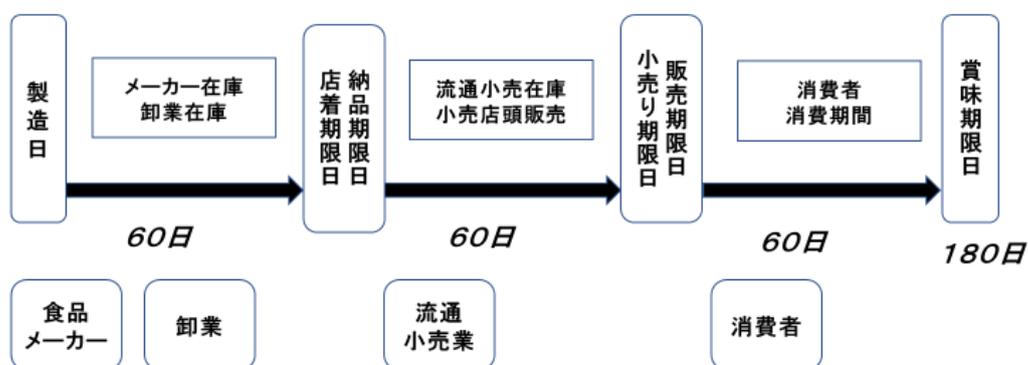
食品ロスの発生抑制方法については、製造業では、「従業員で消費」、「3分の1ルール」の緩和が多く、流通業では、「在庫を減らす」、「値引きして消費者に販売」、「綿密な需要予測」が多い[23]。

食品廃棄物の実態調査とリサイクルの実態調査の研究報告が牛久保明邦により2003年に発表されており[24]、行政・事業者ともに削減に取り組むとして、飼料等へのリサイクル・後述する納品ルールの設定・賞味期限延長の技術開発[25]・包装容器の新機能開発[26]等が推進されている。

## (2) 製品の納品ルール

食品には廃棄ロス削減の観点から、流通業が主導し納品販売日付のルールが設定されている。このルールは食品流通の商習慣として「3分の1ルール」と呼ばれており、90年代に大手流通業が導入し、他の流通業にも浸透していったルールである。このルールは、食品の流通過程において製造者(製造業、卸業も含む)、販売者(流通業)、消費者の3者が、製造日から賞味期限までの期間を3分の1ずつ均等に分け合うという考え方に基づいた商慣習である[27]。

納品期限 3分の1ルールの概念と納品関連図 (賞味期限180日製品の場合)



流通小売業⇒卸・メーカーへの返品は、ほとんど発生していない。  
納品期限切れの製品は各業種(メーカー・卸業・流通小売業)で処分されている。

図1-3 3分の1ルール概略図

この納品期限ルール の 目的と内容は、農林水産省の聞き取り調査報告によると以下の通りである[28]。

#### ① 納入・販売期限の設定方法

納入・販売期限として「納品期限」は、出来るだけ販売期間を多く確保し、売れ残り（ロス）を少なくするために設定されている。「販売期限」は、消費者が購入後、賞味期限内に適切に消費される期間を確保するために設定することを目的とする。一般的には「納品期限」は、製造日から賞味期限までの期間の3分の1の時点、「販売期限」は、3分の2の時点としている。（「3分の1ルール」と呼ばれている）。

#### ② 期限設定を3つに分ける理由

製造業、流通業、消費者の3者が、製造から賞味期限までの期間を均等に分け合うという考えに基づいている。

#### ③ 商品特性に応じた設定事例

賞味期限が長い商品については、販売期間が長くなるように設定することがある。例えば、賞味期限が2年の商品の場合、納入期限を製造から半年の時点に設定し、販売期限を賞味期限から半年残した時点に設定する。また、季節商品など回転率が高く、比較的短期間に消費される商品については、販売期限を後ろ倒しに設定することがある。

### （3）販売期限経過後の商品の処分方法

以上の納品ルールにおいて販売期限経過後の製品の処分方法としては、廃棄が原則となっている（食品廃棄を削減するため社員販売を行う場合もある）。製造業からの納入期限を経過した製品の処理としては、卸業・流通業への廉価販売による製品としての処理と、廃棄処理するものがある。

以上、食品の納品販売期限ルール「3分の1ルール」について述べたが、このルールは食品ロスの低減を巡って製造業と流通業の利害の対立が発生する。その例が納品期限の設定方法である。製造業にとってメリットとなる納品期限の緩和について、3分の1から2分の1にした場合のパイロットプロジェクトでの食品ロス削減の成果報告と3か月以上の賞味期限製品での年月日表示から年月表示にした場合の効果と課題等が研究発表されている[27][29]。

### （4）製造業の日付別在庫納品

前述のとおり、製造業は流通業が主導して設定している納品期限を遵守する必要がある。また、この期限ルールとは別に賞味期限日付逆転納品禁止ルールがある。このルールは各納品先に対して、3分の1以内の日付であっても、前回納品した賞味期限日付よりも古い製品の納品を禁止するというものである。

よって、在庫拠点が複数の場合、他の在庫拠点から転入して納品したい場合、転出先の製品の出荷賞味期限日付が当該在庫拠点から出荷した最も新しい賞味期限

日付より古い場合は転入しても納品はできないことになる。そのため、製造業は生産工場と在庫拠点ごとに、製品別・賞味期限別の在庫管理と出荷コントロールをする必要がある。このような管理とオペレーションを効率的に実施するには、販売計画と生産計画、輸配送計画をするためのSCMの導入と活用が非常に有効になる。

スマートファクトリー構築に関しても、納品期限ルールを前提としてSCMの主要な機能である需要分析、販売計画、生産計画が機能しており、各製品別に生産日付別の管理ができるという前提で、プラントデザイン、システム構築をしないと、工場運営と製造運用のスマート化の効果が薄いものになってしまうことになる。

食品メーカーの納品期限と在庫の関係

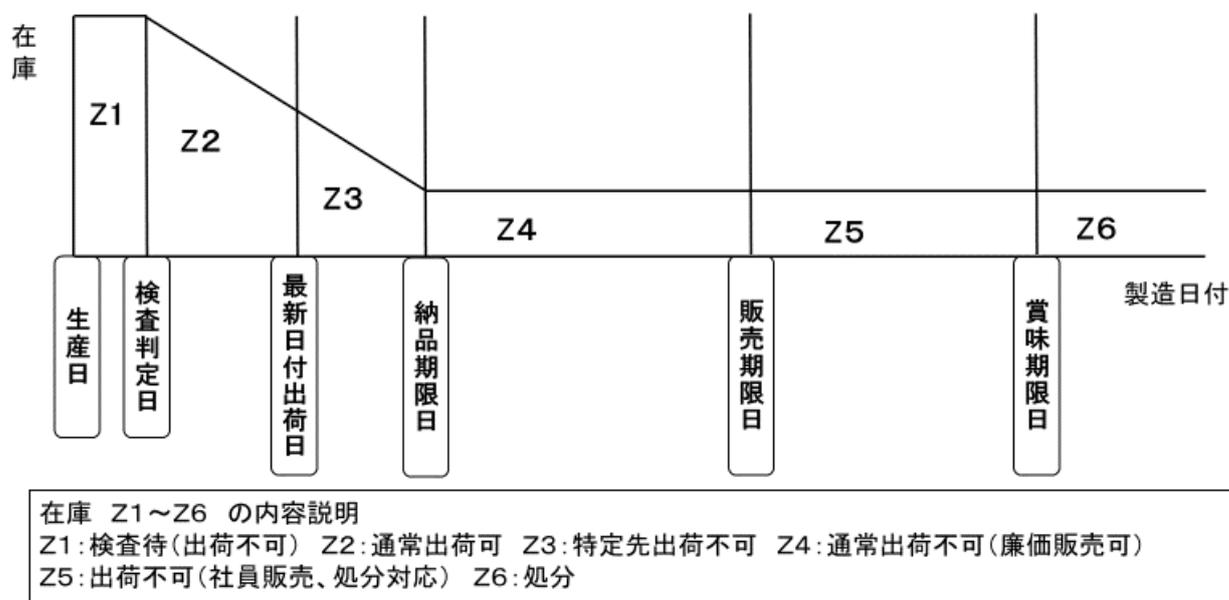


図1-4 製造業の納品期限と在庫の関係

図1-4に製造業の納品期限と在庫の関係を示す。Z1~Z6の各在庫の内容は以下のとおりである。

- **Z1**：通常、製造業の工場管轄倉庫で保管されている製品在庫であり生産部門の帰属在庫となる。製品検査で出荷規格に合格すると、Z2在庫に計上され、出荷可能在庫となる。不合格の場合は、処分在庫または再製造に回される在庫となる。

- **Z 2**：通常出荷可能在庫である。通常は納品期限より新しい製品が出荷されているため、このZ 2在庫が出荷可能在庫となる。複数出荷拠点を有している場合、出荷日付逆転禁止ルールにより、最も新しい出荷製品日付の出荷拠点からは他の出荷拠点からの納品先に出荷できるが、その逆はできない。よって、拠点間製品転送の制約条約となる出荷製品日付在庫となる。また、特定の流通業は3分の1ルールとは別に、日付指定納品をしている所もあり、卸業から製造業の発注に日付指定される場合がある。この場合は、1か所の製造業出荷拠点での複数出荷製品日付管理が発生する。製造業・卸業のスマート化にはこのような出荷形態にも対応できるようなシステム構築とオペレーション設計が必要となる。
- **Z 3**：納品期限、3分の1ルール範囲内の製品在庫であるが、各拠点での最新出荷製品日付より製造日の古い在庫(賞味期限が短い)となるため、通常販売出荷は不可となる。特定流通業の日付指定出荷の場合は、当該チェーンのみ販売出荷が不可となる。

この期間の在庫は、Z4の3分の1ルールを超える在庫となることを回避するため、消流対策を実施する。消流対策とは、販売対策費を使用して、値引き販売を実施することである。複数出荷拠点を有している場合、拠点間で最新出荷日付がずれていると販売進度の悪い拠点は製品日付が他の拠点に対して古くなる。そして3分の1期間までに販売のめどが立たない場合は、進度の良い拠点に転送し消流対策で対応することになる。

- **Z 4**：この期間の製品在庫は、3分の1ルールを超えているが、流通業の販売期間の範囲内であるため、営業交渉により廉価販売で消流させる在庫となる。
- **Z 5**：この期間の在庫は、流通業の販売可能期間を超えており、賞味期限まで3分の1以下の消費者での賞味期間日付の在庫となる。そのため、製造業では販売不可能な在庫であり、社員販売等で処分するか廃棄等の手段で処分をしなければならない在庫である。
- **Z 6**：この期間の在庫は賞味期限切れの在庫のため、製造業は廃棄処理をする在庫となる。

製造業の全出荷拠点の通常出荷可能在庫の総量は、次式で表される。

$$EZ = \sum_{i \in I} \sum_{j=a1}^{a2} Z_{ij} \quad (1-1)$$

変数の説明

$EZ$ ：出荷有効在庫

$Z_{ij}$ ：拠点別製品日付別在庫量

$I$  : 出荷拠点のテンデックス集合  $I = \{1.2.3 \cdots n\}$

$j$  : 製品日付

$a1$  : 検査合格製品日付

$a2$  : 拠点別最新出荷製品日付

## 1. 3. 4 食品の物流方式と対応

### (1) 物流方式

#### ① 製造業の自社内物流

加工食品の製品物流は、製造工場を起点として発生する。原料から加工された製品は通常工場倉庫にて、製品検査の結果を待ち出荷検査に合格したものが出荷可能在庫として計上される。自社工場に製品保管倉庫のキャパシティが小さい場合は、製造業が委託した営業倉庫に転送され、製品在庫として保管される。この在庫は製造業が管理所有する製品在庫である。

#### ② 製造業～卸業～流通業（量販店・コンビニエンスストア）への物流

製造業は卸業に販売する比率が大きい。製造業から卸業、卸業から流通業、小売店への物流について述べる。

製品検査が合格した製品は、製造業所有の倉庫及び製造業が委託した営業倉庫に輸送する。この倉庫より、受注した物量の製品を卸業の物流センターに製造業に委託された運送業者が配送する。卸業は流通業からの受注物量を各流通業のセンターに配送する。流通業は各小売店からの受注量を各店舗に配送する。以上の流れの中で、卸業の物流センターに納品するところまでが、製造業の管理所有する製品在庫となる。また、製造業のSCMで管理調整する製品在庫は卸業に配送するまでの在庫量・在庫日数となる。卸業は設定している在庫日数に基づいて納品量を発注する方式を採用していることが多い。流通業は各小売店舗の受注に基づいて卸業に納品量を発注する。

製造業の欠品とは卸業納品に対する欠品である。小売店頭が欠品するのは卸業から流通業店舗への在庫がない場合であり、製造業の欠品イコール店頭欠品になることは少ない。

また、製造業で生産されてから小売店舗に並ぶまでの日数は次式の通りとなる。

$$TD = \sum_{i=1}^4 D_i + \sum_{j=1}^4 L_j \quad (1-2)$$

変数の説明

$TD$  : 生産されてから小売店舗に並ぶまでの日数

- $D_1$ ：製造業の検査日数
- $D_2$ ：営業倉庫在庫量／(卸業への販売計画量/日)
- $D_3$ ：卸業センター在庫量／(流通業への販売計画量/日)
- $D_4$ ：流通業物流センター在庫量／(小売店舗販売計画量/日)
- $L_1$ ：工場～営業倉庫輸送リードタイム日数
- $L_2$ ：営業倉庫～卸業センター輸送リードタイム日数
- $L_3$ ：卸業センター～流通業物流センター輸送リードタイム日数
- $L_4$ ：流通業物流センター～小売店舗輸送リードタイム日数

現状での製造業のSCMの管理調整は卸業への販売計画量に対して運用していることが多い。よって、製造業が在庫日数と呼んでいるのは、通常 $D_1$ と $D_2$ の在庫量となっている。

### ③ 流通業倉庫補充方式（コンビニエンスストア等）の物流

一部のコンビニエンスストア、流通業は、寄託倉庫に製造業が製品を補充する方式を取っている。この方式は、製造業所有の倉庫及び製造業が委託した営業倉庫から、コンビニエンスストアの寄託倉庫の在庫状況を製造業が把握して製品を補充している。寄託倉庫の在庫管理は製造業に委ねられている場合が多い。

### ④ 業務製品のユーザーへの物流

業務製品は最終納品先が、ユーザーの工場の場合がほとんどである。業務製品には一般販売している汎用品と特定ユーザー専用の留型品がある。製造業所有の倉庫及び製造業が委託した営業倉庫から、汎用品は業務製品卸業を経由して、ユーザーに配送される。

留型品は特定ユーザー専用のため、製造業所有の倉庫及び製造業が委託した営業倉庫からユーザー工場に直接配送している場合が多い。

## （２）物流情報

### ① 物流情報の流れ

物流情報の流れは基本的には川下の小売店から流通業地域本部、卸業、製造業となっているべきであるが、必ずしもそうっていない。

通常、製造業の商談は流通業本部と実施されている。この時点では流通業の発注数字は確定しておらず、納品価格と概算数量が決定されるが、実際は商談適用日での小売店の実際売上げにより発注量は決定されることになる。そして、この発注量は通常卸業への発注数量であり、製造業ではこの時点で流通業の発注数量は情報として掴めないことが多い。

## ② 情報と物流のギャップ

事業者間（製造業・卸業・流通業）の物流は、取引データによって実施される。これは、受発注データと納品指示データ等である。この情報は独立に発生処理されている。また、各社において製品コード体系が共通化されていないため、川上側の処理するシステムは、川下の会社に合わせた仕様にならざるを得ない。

そして、確定した取引情報と実際の物流業務に時間的な差異が発生していることも多く、製造業は見込量で自社内物流を遂行している。製造業の納品先は、卸業の場合が多く、実際の小売業の卸業への発注量は把握できていないことも発生している。このため、製造業の製品在庫コントロールと生産量決定は、製造業の販売見込量で決定されており、精度を向上させめには、流通小売業・卸業・製造業が共通のデータを共有することが求められている。

本来、共有化されると有効である情報として、以下のものがある。

- ・ 小売数量、チェーン別小売数量、POSデータ
- ・ 流通業地域別発注量、チェーン別発注量
- ・ 流通業地域センター在庫量
- ・ 卸業発注量（製造業受注量）
- ・ 卸業センター在庫量
- ・ 製造業在庫量
- ・ 製造業生産計画量

### （3）生産物流に対する現象分析と対応

前項までの食品の物流方式、物流情報の流れと製造業の生産方式を含めて、現状分析と対応・課題が研究されている[30]。上記の物流方式、情報管理を含む食品流通システムに生産を機能的に調整・統合していく原理に Bucklin の「延期－投機」の原理がある[31]。この原理はSCMの理論研究の中で、注目されてきた理論である。この原理では、生産と物流、流通の機能というものが分離、移転が可能であるという前提に立って、その生産と物流、流通を構成している主体がその機能をどう分担していくかということをも明らかにすることを目的としている。

「延期－投機」とは、以下のことを指す。

延期とは、最終需要が発生する時間に近い時点で生産や各業種間の在庫移動が行われる場合に生産や流通が引き延ばされているという意味で延期という。最も延期されるパターンは受注生産となる。

投機とは、最終需要が発生する時点からみて、生産を前もって、前倒しで見込生産が行なわれるものである。

一般的には、不確定要素の高い需要の製品に対しては、投機より延期の方が、同期性が高いとされている。しかし、食品には前述のとおり日付管理と納品期限ルールが存在し、この理論に適合させることは難しいことが多い。

現状は、日配型製品は「延期」生産・物流が可能であり、工場の生産機能と物流機能も「延期」に対応できるようになってきている。

また、在庫型製品は工場の生産能力、販売期間から「投機」の方が有利であると考えられ、在庫調整で「投機」でのロスも提言し、全体的な効率化を追求している。

実際、製造業から卸業、流通業の各業種間の製品の移動は、取引によってなされているが、この取引関係はゼロサムではなく、マイナスサムであったり、プラスサムであったりするというが、ゲーム理論でも実証されている。

以上述べた生産と流通との機能的な結合と、それに対応した企業間の緩い提携関係というものは、売手と買手にとって両方プラスとなるプラスサムな状況をどうやって作るかということを目指していくべきである[30]。

そのためのサプライチェーンでの業種間において、提携的で互酬的な関係性を形成するための機能時要件は、次の2つが大きいと言える[32]。

#### ① 業種・企業間の情報の共有

各業種・企業間により、競争条件に係る情報や経営資源の情報の共有は不可能であるが、サプライチェーン上の製品情報を共有することは、プラスサムを生み出すことができる。

#### ② 経営資源の相互補完状況

業種間・企業間で所有している経営資源が相互補完状況にあるということである。このことにより、企業間連携が強固になり、効率化が図れることになる。

また、食品卸業の機能と、企業間サプライチェーンを超えたサプライチェーン全体に働く有効性、すなわちマクロ効果の実証研究報告がある[33]。

これによると、複雑なサプライネットワークの全体最適化は困難であり、部分最適化の克服に対して、卸業の主要な機能を、物流機能、情報伝達機能としている。卸売業における物流機能とは、製造業から各種の製品を入荷・保管して、需要に応じた品揃え形成を行い、流通小売業かの注文に応じて出荷・輸送を行うことである。この機能によるサプライチェーンへの社会的貢献は、広域にわたる取引先をカバーする能力となる。この効率性は、取引数単純化の原理の適用に基づいて、取引をどの程度集束できるかに関係する。こうした特性は流通段階の短縮化にも寄与し、サプライチェーンの効率性に対する貢献は小さくない。

情報伝達機能については、市場の動態に同期化させることが重視されるサプライチェーンにおいて、情報伝達機能は特に市場に関する情報が焦点となる。サプライチェーンを体の血管に喩えれば、情報の流れは神経系にあたり、物の流れのコント

ロールに強く関与する。サプライチェーンの中間点に位置する卸売業は、情報の中継点として社会的に大きな意義を持つものと考えられる。下流からの市場情報の提供を受け、それを集約・加工することができる。そうした情報や企業間調整のフィードバック情報を、上流や下流に提供すると、その情報を受け取った側は、その利用を通してサプライチェーン活動の調整にコミットでき、卸業の情報伝達機能は取引先に企業間調整機能を促す効果をもたらす可能性がある。

このような因果関係モデル(共分散構造分析モデル)を、物流効果についてのモデルと情報効果についてのモデルとして提示している。そして、現状のSCMの成果についての配分方法が確立されていないことは問題であり、成果を正確に測定し、公正に配分するシステムが必要である[33]。

以上のことから、今後は、サプライチェーンのスマート化を推進していくためには、機能共有と情報共有による、製造業、卸業、流通業の効率化のためにスマートファクトリー、スマートロジティクス、システムモジュールを水平形成し、サプライチェーンに展開していくことが重要である[34][35]。

## 1. 3. 5 食品安全性のためのトレーサビリティの確保

### (1) 食品におけるトレーサビリティ確保の必要性

2000年以降、製造業の品質不祥事が相次いだ。製造業の品質保証は、製造工程管理・物流過程での管理として、HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point)、ISO (International Organization for Standardization)、FSSC (Food Safety System Certification) 等の認証を受け厳密に実施している企業が多い。しかし製品品質上の不具合は現在も発生しているのが現状である。製造工程管理を強化していくことは言うまでもないが、品質事故が発生した時にいかに迅速に対応するかということが重要である。そのために、製造工程の品質管理とは別に使用した原材料から、製造工程の状態記録、製品の保管状態等の情報を迅速に把握し、製品回収等の対応を決定するために、トレーサビリティ確保のためのシステム化は必須である。

トレーサビリティは、英語のトレース(trace:足跡を追う)とアビリティ(ability:できること)を合わせた言葉で「追跡可能性」と訳されている [36]。

農林水産省では、トレーサビリティの概念を「生産・加工・流通等のフードチェーンの各段階で食品とその情報を追跡できること」としている。そして、

- ① 食品の安全性に関して予期せぬ問題が生じた際の原因究明や、製品の追跡・回収を容易にすること。

② 「食卓から農場まで」の過程を明らかにすること。

以上の2つの観点から、食品の安全性や品質、表示に対する消費者の信頼確保をするものであるとしている[36]。万一食品事故が発生した場合にその原因究明を容易にする「リスク管理の手法」として、また、消費者が自ら食品の生産方法等の情報を引き出すことにより安心して食品を購入でき、農場から食卓までの顔の見える関係を構築し、「消費者への信頼を確保するための手法」としてトレーサビリティシステムが注目されている。農林水産省では、トレーサビリティシステム普及のために、食品トレーサビリティの「実践的なマニュアル」を作成・公開した[37]。

そのような中で、食品産業は、食品の安全という概念を他の業界に対して相対的に捉えているという指摘があり、製造段階だけでなく、流通過程においても食品産業の責任が顕著に認識されている。さらに消費者からは、製造業だけでなくサプライチェーン全体で取り組むべき問題であるという意識が増加している。そのためには各事業者の「責任の重層化」という概念が必要になる[38]。

## (2) 食品トレーサビリティの取組内容

トレーサビリティを確保するための、トレーサビリティシステムは追跡・遡及のシステムであり、製造過程での製品の品質管理、安全管理のシステムとは別のものである。関係法規を遵守し安全なものを生産することは製造業が当然やらなければならないことであって、トレーサビリティシステムはこれら安全・品質管理のシステムと組み合わせ、トレースデータの有効性・信頼性を高め、効果の高いシステムとしていくべきである。

現状では、食品事業者や消費者によって、製品差別化のための追加的な情報提供の仕組みであると捉えられてしまう向きもある。しかし、原材料の受け入れ記録やそれに関連づけられた製造と製品の流れに関する記録は、表示の適正さを確認する際に社会的検証の資料に成り得る。よって、フードチェーンにおいて広く生産・流通のどの段階にある食品でもトレーサビリティのための記録が保持されていれば、その情報を活用してフードチェーン全体として表示の信頼性を担保できるようになる[39]。

しかし、導入が法で定められた食品<sup>1</sup>以外にトレーサビリティシステムの普及が進まない要因としては、普及のための前提となる条件が整備されていないことが考えられるという意見がある[39]。トレーサビリティをシステム化することは、各業界企業の任意であるため、サプライチェーン上のすべての事業者が参画・取組まなければならないものではない。食品サプライチェーンを構成する、製造業・卸業・流通

---

<sup>1</sup> 米トレーサビリティ法(2009)米穀等の取引等に係る情報の記録及び産地情報の伝達に関する法律。牛トレーサビリティ法(2003)牛の個体識別のための情報の管理及び伝達に関する特別措置法

業までの複雑な生産・流通形態と連動したトレーサビリティを構築することは難しい面があるのは確かである。よって、構築可能なところから段階的に取り組んでいくことが必要であり意義を持つことになる。またこの場合、取り組んでいる事業者が、受持つ責任範囲を明確化し、他のサプライチェーン上の事業者と共有しておくことが重要である。

### (3) 食品トレーサビリティの方法と展開

トレーサビリティにおいて、川上からの「追跡」は、トラッキング(tracking)またはトレースフォワード(trace forward)と呼ばれ、川下からの「遡及」はトレーシング(tracing)またはトレースバック(trace back)と呼ばれる。本来、トレーサビリティシステムの構築とは、取得保存したデータから「追跡」「遡及」の双方向のデータ検索を可能にするものを意味する。

食品のトレーサビリティは、サプライチェーン上の各事業者で独自にシステム化されていることが多い。事業者とトレーサビリティデータは次のように分けられる。

- ・ 製造業へのサプライヤー

原材料の原産国と製造者、製造工場、原材料資材の成分、製造ロット、調達物流データ等。

- ・ 製造業

製品ロット別の使用原材料、使用資材、製造状態データ、製品の検査結果、製造に使用した設備、出荷先、出荷先への物流データ等。

- ・ 卸業

調達先、出荷先、物流データ等。

- ・ 流通小売業

調達先、店舗配送データ、小売店在庫、POS販売データ等。

製造業を起点としたトレースフォワードとトレースバックの実施例を以下に示す。

#### ① トレースフォワード

製造業の工場で、ある原材料で異常が発覚した場合のトレースフォワードの例は以下のようなになる。

- ・ 製造業トレーサビリティシステム

当該原材料データとして、異常が発覚した原材料名、原材料ロット、サプライヤー、納品日、原材料の異常内容(検査データ等)、原材料保管状態、当該原材料の使用データとして、投入製品、製品ロット、使用した製造ライン、設備、製造時刻、製品検査データ等をデータベースより検索する。

その中から、原材料名、原材料ロット、サプライヤー、納品日、原材料の異常

内容（検査データ等）、原材料保管状態をサプライヤーに連絡する。サプライヤーは、製造業から提供されたデータより、当該原材料の調達先、製造加工データ等から、他の原材料への普及を確認判断する。また、当該原材料と同様と思われる原材料ロットを特定し、製造業に連絡をする。このデータにより、さらに製造業は対象とする製品を特定する。

また、製造ライン・設備、製造時刻データより、当該原材料が使用されていなくてもコンタミが発生する可能性のある製品を特定する。

製造業において、特定された製品が製品の出荷規格検査が合格していれば製品の安全性と製品規格は確保されているが、トレーサビリティの確保として、特定された製品の現状をトレースする。出荷前の場合は保管場所を、出荷された場合は、出荷先、出荷日等を特定する。ここまでの、製造業のシステムでのトレースフォワードデータとなる。

#### ・ 卸業トレーサビリティシステム

卸業は製造業からの連絡を受けることにより、製造者・製品・製品ロットの情報及び対象製品の発注・納品情報を得ることができる。これらの情報から、発注データ・納品データ・在庫データ・受注データをトレースして、現在、対象製品の物流状態を把握する。さらに、流通業からの受注データ、配送データから、対象製品の出荷先を特定し、出荷した可能性のある流通業センターを特定するトレースフォワードを実施し、流通業に連絡する。

#### ・ 流通業トレーサビリティシステム

流通業は製造業及び卸業から受けた情報により、流通センターへの入庫データ、在庫データ、小売店舗へのお荷データをトレースフォワードして、対象製品の所在を確認することができる。

また、小売店舗へ配送済みの製品は、商品棚に陳列した日付時刻の記録があれば、販売状況を把握することができる。そして、POS データから対象製品の販売個数、時刻までの製品販売状況を把握することができる。

以上のトレースフォワードの情報は、対象製品の製造者である製造業にフィードバックされ、対応策を各事業者で決定していくことになる。

## ② トレースバック

トレースバックは、次の場合に実施する。

#### ・ 消費者から製造業への連絡によるもの(クレーム等)

消費者から製造業へ製品の異常等の連絡を受けた場合、製造業はまずその状態を詳細に把握する必要があるため、製品の引取りを行う。

引取りまでの間に、消費者から製品の購入場所、時間等をヒアリングし、製品

の製造場所、製造ロットを特定する。そして、製造ロットが特定されると、対象製造ロットが製造された時の製造条件の実績データ(製造ライン・設備状態・使用設備・各設備の使用した時刻・作業オペレーター等)を特定する。

そして、対象製品に含まれる原材料を特定し、対象製品と同一の原材料を使用したと推定されるロットの製品の製品検査記録を照合し、検査結果を確認する。

以上のトレーサビリティデータから、生産起因で製品に不具合が発生したものを判断する。生産起因が想定される場合は、卸業、流通小売業にトレースフォワードを実施してもらい、対象製品の在庫場所、販売状況を把握する。

生産起因が想定されない場合は、物流輸送状況、卸業の在庫管理状況、流通業での保管状況、店舗での陳列状況等のトレースフォワードデータから、サプライチェーン全体での発生原因を特定するためのデータ分析を実施する。

- ・ 流通業、卸業から製造業への連絡によるもの

流通業の店舗や流通センター、卸業のセンターで製品に異常が発覚した場合は、流通業が納品されたデータから各小売店舗への配下状況を把握し、各店舗での製品検査を実施し、製品の安全性を確認・確保する。卸業の場合も同様に、流通業に連絡しトレースフォワードにて製品の安全性を確認・確保する。

そして、対象製品の製造業に迅速に製品の状況を連絡し、製造業は消費者からの情報取得の場合と同様に、発生原因を特定し生産起因があるか判断する。生産起因が想定される場合は、対象製品のトレースフォワードを実施し、対象ロットの出荷停止、販売停止を実施して安全を確保する。

以上、製品に異常が発覚した場合は、トレースバックでの原因究明、トレースフォワードによる対象製品の状況把握を実施するが、既に消費者に販売されていて、安全性に問題が認められる場合は、告知回収を実施することになる。

この場合、トレーサビリティデータの精度により、対象となる製品の幅に大きな差がでる。そのためにもトレーサビリティシステムは重要であり、サプライチェーンでのデータ連携が求められている。

#### (4) 食品トレーサビリティ確保の課題と対策例

以上述べたトレーサビリティ確保は、各事業者(サプライヤー・製造業・卸業・流通業)でトレーサビリティ確保のためのシステムを有しているか、トレーサビリティ確保ができる業務データ管理を実施していないと実現はできない。実際は、各事業者の企業でデータの精度は異なっており、またシステム連携も取引によるものがほとんどである。

よって、各事業者は、取引のある企業のデータは取得できるが、サプライチェーン全体のトレーサビリティデータは連動していることはない。そのため、サプライチェーン全体のデータ連携は、スマート化を推進する上での大きな課題である。

この対応について、政府や業界団体などの主導により進められている電子タグや二次元バーコードを利用したトレーサビリティシステムの各種実証実験からも伺えるように、企業経営の効率化や競争力強化の視点からの検討も必要であるとしている。それは、トレーサビリティシステムの構築により、製品や部品、資材などの追跡管理がより正確に、また詳細に可能となることにより、品質管理や在庫管理、検品、出荷、物流業務などの効率化やコスト削減が期待できるからである[40]。

また、食品のトレーサビリティシステムの成否は、安全性を求める消費者のニーズがどのくらい高いか、また、消費者が自ら商品の安全性の確認ができるということにどれほどのプレミアムを支払う用意があるかに依存していると言える。

そして、重要なのは、トレーサビリティを実現するために蓄積・管理される生産履歴や入出荷履歴、販売履歴などの情報は、遡及的に参照・利用されるだけのものではなく、企業における在庫管理や品質管理など業務の改善・向上、コスト削減にも有効であると考えられることである[40]。

例えば、雪印メグミルクや明治では、品質保持期限管理の徹底を図るために生産・物流システムの再構築に当たり、その枠組みの中でトレーサビリティを実現している。そして、このシステム化により、出荷情報を元に製品の製造ラインや原料貯蔵タンクが迅速に特定されることで、製品回収や、不良あるいは事故の原因分析の正確化・迅速化が可能となったと同時に、日報で生産情報や出荷情報を管理する必要がなくなるなど、既存業務の見直しや改革に対する効果を見出している[41]。

そのような中で、単独企業と限定的な企業間では情報伝達ツールとして、電子タグ等の実用化が進みつつあるが、商品流通の川上から川下まで、複数の企業や事業者をまたいだもの(垂直連携・水平連携)、さらに国際的なトレーサビリティの確立(原料の海外調達)、サプライチェーン全体の効率化の実現には課題が多い。

本来は、トレーサビリティデータがビジネスプロセスに従って一貫して管理されるためには、それらの情報を企業間で共有するための情報ネットワークや共有データベースの整備が必要となる。また、トレーサビリティデータの真正性を担保する仕組みも求められる。よって、信頼できる企業間情報の共有基盤をどのように構築・整備していくかが課題となっている[40]。

この意味で、サプライチェーンにおけるトレーサビリティの実現には、企業間における情報共有の技術的基盤として従来から発展してきた電子データ交換 E D I (Electronic Data Interchange) システムの果たす役割が期待される。しかし、E D I システムの導入や運用には様々な問題点が存在しているのが事実であり、その普及には今日でも課題が多い。以下では、トレーサビリティシステム確立のための情報共有基盤として E D I システムを捉えた場合の問題点をいくつか指摘する[40]。

① E D I データとプロトコルのオープン化

企業独自のコード体系やデータフォーマットになっていることが多く、同一製品でも複数コード体系をシステム管理しなくてはならない。コードの標準化は試みられているが、統一化が難しい状況にある。また、通信プロトコルも標準化されていないため、複数の手順が混在している。

② E D I データ所有権の問題

E D I データは基本的にポイント・ツー・ポイントの企業間で交換・共有されているため、商品の物理的な移動に伴って移転するトレース情報の所有権と守秘義務の扱いが問題と成り得る。

③ E D I データの二次利用

E D I データの二次利用についてトレーサビリティシステムとの連携を考えると、トレーサビリティシステムで蓄積・管理される商品の履歴情報は、単に消費者への情報提供のためだけでなく、企業の生産や在庫管理と連動させることで、既存業務の改善や改革に繋げていく視点が必要である。

④ モジュール化への対応

生産工程のプロセスや生産システムは、インターフェースを標準化してモジュール化し、システム分割していく傾向がある。これは、技術や水平展開のスピードアップにつながるが、内部がブラックボックスとなる場合がある。これによりトレース情報の蓄積方法の統一化、他社のトレース情報へのアクセス権の設定管理が必要となり、トレーサビリティシステムの運用管理の問題を解決する必要がある[42][43]。

⑤ 情報共有に関する契約締結の低調さ

企業間での連携協力関係において情報共有の問題をどのように処理するかについての解決方法として、当事者間で具体的・詳細な契約を交わし明確にしようとするのが不足している。

⑥ 受益者とコスト負担者との分離

トレーサビリティシステム構築によるメリットを享受する受益者とコスト負担者が必ずしも一致しないケースが十分に考えられる。いずれにせよ、トレーサビリティシステム構築のコスト負担(転嫁)の仕組みの検討が必要である。

次に、ICT、IoT、モバイル等の先端技術のトレーサビリティシステムへの活用によるトレーサビリティ確保の進化についての研究では、トレーサビリティに対する視点を他の研究とは変えている[44]。ICTの進化により、金銭などの対価と交換する所有権販売型のビジネスモデルしか採用できなかったものが、商品が誰によって利用されているかを提供者が把握し続けることができるようになると、売

り渡すかわりに、特定の時間内の利用権だけを与え、別の時間には別の利用者に提供するモデルを採用することが可能となるため、事業者が一部の商品に対して適用できていたモデルが、モバイル技術などの発達によってトレーサビリティの範囲が拡大し、ビジネス市場でも適用可能範囲が広がったりして、新たに大きな展開が生まれているのが2017年時点の現状と分析している。

以上述べた通り、トレーサビリティの確保は、企業経営の効率化や競争力強化の視点からの検討も不可欠であり、それは、トレーサビリティシステムの構築・運用により、ブランドイメージの向上やマーケティング分野への応用、品質や在庫管理、物流業務等SCMの効率化が期待できるためである。しかし、サプライチェーンの上流から下流、そしてリサイクルや廃棄段階まで一貫した商品の追跡管理を実現するためには、EDIシステムなど企業間における情報共有基盤の整備、トレース情報の標準化、情報の真正性の担保など、サプライチェーン上の事業者全体で、あるいは事業横断的な取り組みが求められると言える。

#### **(5) 食品トレーサビリティシステムの構築事例**

##### **① J A全農の牛肉安心システムの構築事例[45]。**

これは、食品安全供給システムのあり方にテーマを当て、J A全農が構築した全農安心システムについての事例研究である。

この事例では、システム構築に当たり、課題として、3つの基本条件を設定している。第1は、安全な食品の生産・供給に係わる明確な基準確立である。基準設定の際には、「商品そのものの品質」だけではなく生産・製造方法などの「プロセスの品質」までが考慮されるべきであるということ。第2に、農場から食卓までのトレーサビリティの確立と情報開示である。ここでは、とりわけ開示情報の内容と範囲の明確化が重要であるということ。第3に、生産・流通過程で決められた基準が厳格に守られているか、また、開示された情報内容が実際の内容と一致しているかを独立の第3者が客観的にチェックする体制が必要であるということである。

これらの基本条件を満たすようなシステム構築を実現し、生産者から流通業、消費者までの信頼関係が「安全性」という共通意識で築かれたとしている。また、今後の課題として、1.システムの拡大とその条件、2.リスク分担関係の明確化、3.検査・認証の信頼・客観性の確保、4.追加コストの公平な負担の仕組み、5.システム参加業者の意識改革という5点を挙げている。

以上、この取組は農業生産から流通業までを対象としており、食品安全性の取組みとして意義のあるものである。

##### **② 飲料工場におけるトレーサビリティとアカウタビリティのシステム構築事例[46]。**

これは、飲料製造において製品 1 本ごとの高い品質保証を実現するために「最新の画像認識技術と情報記録技術」を用いて新しい食品生産システムを構築することを目的とし、サントリービバレッジプロダクツ株式会社神奈川綾瀬工場にて新しいシステムを構築・検証したものである。

この事例研究では、製品の包装品質や加工工程についての情報開示要求が多くなってきている状況に対して、情報開示要求に迅速・正確に回答を行うためには、製品 1 本ごとの高いトレーサビリティ能力と製品 1 本ごとの加工検査結果を保持し、製品が良品であることを保証できるようなアカウントビリティ能力が重要となるとしている。

製造工程上の問題から、製品ボトルの通過順序の著しい逆転現象が起こることは避けられない。この混在により、従来のトレーサビリティシステムでは製品ボトル通過順序逆転の問題は解決できず、それゆえ製品 1 本ごとの加工状態に対する正確な情報を得ることができなかつたとし、新規に以下の 2 つのシステム構築をした。

- 新システム 1 (New system1)

製品ボトルに 7 桁の連番数字を印字して主要加工点 (2 点) にて読み取る機構を持たせたシステムを構築した。

- 新システム 2 (New system2)

従来用いられていた、2 次元バーコード原料 QR システムと、2 次元バーコード包材 QR システム、及び今回導入した、新システム 1 の履歴データを 1 つのデータベースに統合し、原料から包材、加工情報を一気通貫でトレーサビリティ、アカウントビリティ対応できるシステムを開発した。

このシステムの実証試験方法として、速度試験と精度試験を検証している。検証の結果、工場の実製造環境下における製品ボトルの設備通過時刻の不一致本数を測定するトレーサビリティ精度試験において、新システムは従来比 98% 以上の飛躍的な改善を実現した。そして、この不一致本数の極小化は、製品ボトルの良品検査結果を証明するアカウントビリティ実現に繋がった。加えて、製品ボトルから原材料種類及び納入元製造日などの属性を検索するトレーサビリティ速度試験において、新システムは従来比 92% 以上の改善を実現することができたと報告している。

また、この新システムは消費者に対するアカウントビリティのレベルアップだけでなく、製造現場から原料や工程の不良製品の市場への流出防止のレベルアップにも有効であることが検証できたが、今後は Web を用いた原料産地開示などの情報提供などの展開の可能性も期待できるとしている。

この取組みと成果は同様な企業への展開ができるものであり、さらに改良を進めていくべきものである。

以上、食品安全性のためのトレーサビリティの確保について、その必要性、取

組み内容、トレーサビリティの方法と展開、課題と取組み事例を、既存研究のレビューを中心にして述べた。トレーサビリティシステムはサプライチェーンのスマート化に不可欠な機能要素である。スマートファクトリーのデザイン、スマートファクトリーを運用するオペレーション、マネジメントを実現するシステムにも取り込むべき機能である。

## 1. 3. 6 食品産業における効率化の取組事例

### (1) 食農連携による垂直チェーンの構築

食農連携による垂直チェーン構築事例とその特徴が分析研究されている[47]。この分析研究によると、フードチェーンにおいて、農業と食品産業の連携における垂直チェーンは様々な局面で進捗している。これまでは、流通業と製造業等、食品産業主導によるチェーン構築が様々な形態に進んできたが、農業主導によるチェーンも求められている。6次産業推進や産業クラスター等、農業主導のチェーン構築を促進する政策が展開されていることから、食農連携に対する期待感が伺える。

この分析研究では、主体間関係論の観点から、これまでのパワー資源によるチャネル統合からチャネルを構成する主体間での情報、価値観を共有し問題解決を重視すべきであり、相互依存から相互協調へ変化していくことが重要であるとしている。そのような状況でサプライチェーンとバリューチェーンが統合化・融合化されることにより、効率化だけでなく、価値提案が図られるとしている。

また、農業サイドに不足している経営資源を、食品事業者とのチェーン構築を図ることにより、主体的に確保していくべきだとしている。

今後の農業主導のチェーン統合化に際しては、マネジメント手法、ビジネスモデルの検討による収益性の確保と、農業地域マネージャの育成が必須である。そして、この取組は地域再生に対して重要であり、農業主導の統合化については多様なシステム間競争における優位性、持続性を検証していくことが課題である。

### (2) 企業間連携におけるファイネット

食品における競合企業の戦略的提携が増加してきている。その中で、物流を中心とした提携として、加工食品業界のVAN (value added network)、EDI、データベース・サービスなどの、情報システム・インフラの共有事業に「ファイネット」がある。このファイネットについて、企業連携と効果についての分析研究がある[48]。

1990年代以降、経営戦略論、経営組織論といった学問分野において、「提携」に関する研究が盛んに行われた。一般的に、「提携」に関する研究には、大きく四つの課題があるとされている。その課題は、1.形成理由(なぜ形成されるのか)、2.形成

過程(いかに形成されるのか)、3.マネジメント(どのようにマネジメントする必要があるのか)、4.発展・進化(いかに発展・進化していくのか)である。これら課題の中で、この分析研究の焦点は、2.形成過程の内、なぜその相手と提携するのかという、提携パートナーの選択要因である。そして、この分析研究では、製造業間の競争関係、製造業と卸業の関係、製造業、卸業に見られる業界標準化への取組に着目し、システム連携であるファイネットの役割効果を述べている。

ファイネットの経緯は以下の通りである。株式会社ファイネットは1986年、冷凍食品のVAN事業を目的に冷凍製造業7社によって設立された。設立の契機となったのは、情報システムベンダーのインテックが冷凍食品業界に対し、日用雑貨業界と同様のVANを構築してみないかとアプローチしたことから始まる。

このアプローチを受け、味の素、ニチレイ、日本水産の大手製造業3社は、オンライン化と、企業間データ交換への対応が重要となると判断し、VAN設立に向け動いた。1987年には加工製造業5社が新たに資本参加し、加工食品も対象とした食品産業VANへと発展した。これらメーカーがVAN設立に積極的に動いたのは、大手メーカーがまずオンライン化の流れを創り出すことで業界全体にその流れを拡散させることを狙ったためである。

2002年には酒類VANであるSJKと機能統合を行い、酒類メーカー、大手食品卸業が新たに資本参加し、酒類・食品業界VANへとさらなる発展を遂げている。これは2000年問題に対して、VANに集約した方が良いという意見が製造業、卸業から挙がったことが直接の動機となっている。

ファイネットの特徴としては、まず競合メーカー間における情報システムインフラの共有という形から始まった。しかし現在、ファイネットはメーカーに加えて卸業も参加する業界の情報システムインフラへと変化を遂げている。SJKと機能統合した2002年、ファイネットは「NEWFINET構想」を打ち出し、標準化推進母体として企業間情報交換の業界標準化を推進するために卸業にも資本参加を求め業界から幅広い意見を吸い上げようとした。これを契機に以前から受発注業務の効率化を進めていた大手卸業は、製造業にファイネットを介したEDIでの取引を要望し、これが起爆剤となり、2001年3月時点で319社であった利用メーカー数は、2002年9月時点には740社と倍増し、酒類・食品産業界のEDI取引の約70%がファイネットを介して行われるようになった。このように2002年はファイネットにとってエポックメイキングな年であり、この拡張過程において情報システムインフラの共有は水平構造から垂直構造へと変化を遂げていったと言える。そして、卸業はここで大きな役割を果たしている。

ファイネットは、利用企業に対して、商品流通VAN、資材VAN、商品情報データベース・サービスの3つのサービスを提供している。コアサービスと捉えてい

るのは商品流通VANであり、中小メーカー向けに Web-EDI のサービスを提供することにより、業界全体のオンライン化の底上げを図っている。

以上をまとめると、ファイネットに見られる提携形態の主たる影響要因は、業界標準化への積極性、すなわち業界全体という枠組みで物事を捉え、かつ自ら積極的にその実現に動くことを誰が実践するのかということと、卸業が果たすロジスティクス機能、すなわちそれが需要充足機能に留まるのか、それとも需要創造機能をも担うのかということではないかと考えられる。

また、提携開始時に製造業が大きな役割を果たしたのは、その利用料を製造業が主に負担していることから判断しても、そのメリットが卸業よりも大きかったことが影響していることを意味する。業界VANの先駆けとして、競合する製造業同士が提携に踏み切った要因は、そのメリットを業界全体という枠組みで捉えていたからだと考えられる。そして現在、ファイネットが垂直的な提携に発展したのは、業界標準化への積極性に加えて、一般的には製造業が担っている需要創造機能を、加工食品業界の大手卸業も有していたからだと言える。加工食品業では、製造業だけでなく、卸業でも業界標準化への積極性とロジスティクスにおける需要創造機能を有している理由として以下のことが考えられる。

加工食品業界の大手卸業は、自ら食品産業を育成するという強い理念を持ち、製造業と一体となって需要を創造する関係を長期に渡って主体的に構築してきたからだと言える。そして、それは同業界の大手卸業における業界標準化への積極性とロジスティクスにおける需要創造機能は長期的に醸成されたものであり、長い歴史の中で培われたもののためであると考えられる。

しかし今後、サプライチェーンにおいて、全体最適な視点から、より一層の効率化を図るためには、製造業間の水平的な提携では限界があり、製造・卸業間、さらには流通業を含めた垂直的な提携によって、共有の情報システムインフラをさらに高度化していく必要があると考えられる。外部環境が変化していく中で、ファイネットがさらに発展的な取り組みに挑戦いくことが期待される。

以上、加工食品業界の提携及び連携と情報システム共有におけるファイネットの役割と効果の分析研究である。

### **(3) プロセスチーズ市場定着の取組**

雪印メグミルクの事例を基に、プロセスチーズの市場における乳業メーカーの役割の調査報告がある[49]。日本のチーズ消費量は、経済成長に伴う所得向上からの食の洋風化を経て、過去半世紀で大きく増加した。2017年度の国内消費量は34万トンに達している。

日本にチーズ市場を定着させたのは、ナチュラルチーズに乳化剤等を添加し加熱溶解後に成形したプロセスチーズである。フラットな風味で保存性が高く、過去に

おける、冷蔵物流網が弱い中で消費者に広く受け入れられた。プロセスチーズの市場定着に当たっては、その特性に加えて、雪印メグミルク株式会社(以下「雪印」)の時流に乗った商品開発が大きく貢献してきた。雪印の事例から、プロセスチーズの発展は以下の通りである。

雪印のプロセスチーズの歴史は、1934年のカートン型の量産開始に遡る。1950年代以降は、海外から自動充填機を導入したことをきっかけに、個包装タイプの6Pチーズや4個入りベビーチーズが発売され、小分けの食べやすい形となった。これらは嗜好品として、おやつや、おつまみ等として直接食べるものである。また、同時期にはスライスチーズが誕生し、料理の素材としても消費されるようになった。こうした用途の多様化は、食の洋風化に伴うパン食の広がりとともに、プロセスチーズの市場拡大に寄与した。こうして、チーズは戦後期以降の日本に定着した。2016年度には、1人当たり年間チーズ消費量は2.4kgに達している。また、1990年代以降は業務用需要が高まり、消費量に占めるプロセスチーズの割合は40%まで低下しているが、現在でも国際的にみると高い水準にある。

雪印は、アジアでの消費拡大を見越して、2013年にインドネシアで同国商社ロダマス社等との合弁工場を設置し、プロセスチーズの販売を開始した。商品企画部門にはインドネシア人スタッフを擁し、同国人好みの硬く濃厚な味の商品の製造・販売を開始している。そして、冷蔵物流網が未発達の本国の事情に合わせ、常温保存が可能な商品となっており、賞味期限は1年を超えるものもある。

欧州起源のチーズをアジア市場で広める際、伝統に縛られない柔軟な企画力と高い製造技術力を有しているという点で雪印は有利である。さらに、アジア市場では食品安全への高い信頼を日本の乳業メーカーが得ているという利点がある。

その一方で、日本では酪農経営体の高齢化等から生乳生産量は減少が続いており、指定団体から乳業メーカーへの生乳販売量は2017年度で724.2万トンと、過去10年間で62.3万トンも減少した。また、そのなかでもチーズ向け販売量は、2017年度は42.8万トンと過去10年間で3.6万トン減少している。

そのような状況の中、雪印はいま一歩踏み込んだ酪農振興策を進めている。2013年に雪印子会社の雪印種苗株式会社は、JAしべちゃと標茶町の共同出資により、株式会社TACSしべちゃを設立した。同農業生産法人は、生乳生産のみならず、研修を通じて新規就農の支援等を行っており、地域の酪農振興に尽力している。

このように雪印は海外への工場設置を進める一方で、サプライチェーンで得られた付加価値を生産者に還元する取組みを強化し、企業理念である「酪農生産への貢献」を果たし続けようとしている。消費拡大のための乳業メーカーの努力や生産振興は、指定団体制度改正を経るなかで一層進むとみられ、今後も注視すべきである。

そして、雪印は2003年からSCMを稼働させ、大きな効果を出してきた[50]。また、さらなるSCMの強化をベースとして、プロセスチーズとマーガリンの新工場を茨城県阿見町に建設した。この工場は総物流センターを隣接し、スマートファクトリーを目指した事業所となっており、現在もさらなるスマート化に向けた改良が実施されている。

本研究の提案モデルは、この阿見工場をベースにモデリングを行い、検証している。

#### (4) S & O Pの実現事例

SCMの課題の多くは、需要量と供給量の不均衡による需給リスクにある。需給リスクは機会損失を生む欠品リスクと在庫過多による在庫リスクから構成されるが、前者が需要超過、後者が供給超過から生じるため、SCMの狙いは需要側の市場と供給側のサプライチェーンの均衡にある。

その中で、加工食品業界は製品に賞味期限が存在し、かつ出荷検査のために製造後数日間出荷できないという製品特性があり、さらに特売の頻度が高いという市場特性による需要の不確実性が在庫リスクを高めているため、需給管理が難しい分野である。

このような状況に対してS & O P (Sales and Operations Planning)を導入して、効果を挙げているカルビー社の分析研究がある[51]。

S & O Pとは、事業計画との整合性を獲得するために、事業全体の財務予算、供給側の生産計画、需要側の販売計画を統合・同期化するプロセスである。海外では有名企業がS & O Pを先行導入しているのに対して、日本では、現状としてS & O Pの普及は進んでいないのが現状である。

S & O Pは数量によるコントロールだけでなく、計画量を財務数値に変換してコントロールを行うため、企業予算に組み込むことが可能になり、強力なコントロール力を有する。こうしたコントロール力がコンフリクトの解消に機能するものと思われる。

S & O Pの手順は一般的に、1.需要予測、2.販売計画（マーケティングに関するコンセンサスを加味した計画）、3.供給計画（生産と調達に関わる初期の生産計画草案）、4.調整会議（マーケティング、生産、調達、財務、物流の各部門が参加して2つの計画を調整し次期計画案に合意する会議）、5.トップマネジメントへの提出を経る。そして、生産キャパシティ等能力管理が含まれるため、計画期間は6～18か月と長期になっている。

カルビーの事例では、特売品問題に着目し、S & O Pの課題を、営業部門の協力問題と小売業者の誘引問題とし、次のような対応を実施した。同社のS & O Pの中心には「定特分離方式」がある。同方式はその名のとおりに、定番品と特売品を分け

て管理する方式である。定番品に対しては需要予測に基づく見込生産とする一方で、特売品に対しては受注生産で対応することに成功した。

カルビーは地域事業本部制を採用している。生産・営業・物流をブロックごとに管理する組織体制とし、規模を適正化して、各地域の需要動向にきめ細かく対応できるように製販を一体化していった。契約農家に対する産地管理もブロックごとに行い、各ブロックに工場を設置することによって、市場の近くで生産し、ジャストインタイムで配送するブロック内需給体制を構築した。

また、定特分離方式のために特約卸業は、いち早く発注データを取りまとめてカルビー側に送信する必要があることからEDI化が必要となる。そのため、特約卸業のEDI化に報いるインセンティブも存在させ、発注処理は定番品と特売品の区別化が推奨されている。その上で、カルビーの需給管理では、生産サイドと営業サイドの間で綿密な情報調整が行なわれている。

一般に食品製造のような装置生産では、生産キャパシティの管理が重要になるが、延期化を行うと活動の平準化は難しくなる。また、馬鈴薯生産は天候に左右されるため、原料供給に関しても不確実性が存在する。このような場合、供給リスクを軽減するためにサプライチェーン戦略にサプライヤー管理を含めることが必要となる。こうした制約に対して同社は、キャパシティの問題に対しては製品導入計画による需要の平準化で、原料供給の不確実性問題に対しては契約農家に対する農地管理で解決していることが解っている。

以上、カルビーの事例の分析研究であるが、このようなSCMの機能は、雪印メグミルクのSCMでも実現されている。

以上、食品産業におけるスマート化の基軸となるSCMを中心として効率化の取組事例の分析研究を述べた。このような取組はスマートファクトリー、スマートロジスティクスを構築して行く上で重要な先行取組である。

### 1. 3. 7 主要製造業の設備投資状況

本節では、有価証券報告書より取得した主要製造業の設備投資額を示し、考察をする。

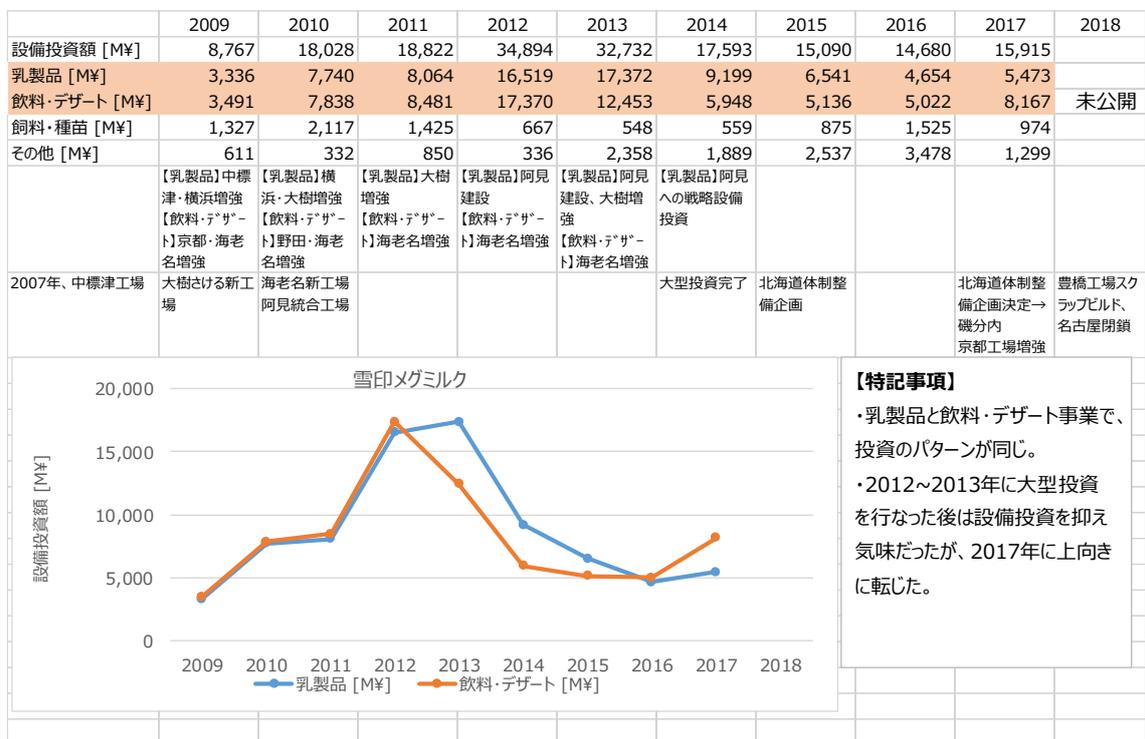


図1-5 雪印メグミルクの設備投資状況

図1-5は、筆者が在籍していた雪印メグミルクの2009年から2017年の設備投資状況である。雪印メグミルクは、2011年からの中期経営計画で、生産体制整備として800億円の投資計画を策定し、大樹工場さけるチーズ新工場建設(2011年)、飲料・ヨーグルトの海老名工場をスクラップアンドビルドし(2013年)児玉工場、日野工場、富里工場を閉鎖統合している。また、茨城阿見町にプロセスチーズ、マーガリン類の統合工場である阿見工場と、原料チーズ・製品物流を統合した阿見総合物流センターを建設し(2014年)、プロセスチーズの横浜チーズ工場、関西チーズ工場、厚木マーガリン工場を閉鎖統合した。また、阿見総合物流センターの建設により、委託していた原料チーズ保管倉庫、製品保管倉庫を自社内に取り込んだ。

その後、北海道工場の体制整備計画を策定し、2018年から磯分内工場にバター新工場の建設に入っている。そして、飲料類は中部地区の体制整備を策定し、豊橋工場のリニューアル建設に入っている。

雪印メグミルクの乳製品統合工場建設（阿見工場・総合物流センター）及び北海道体制整備（大樹工場・磯分内工場）は、2003年から稼働している同社のSCMを基軸にして、企画、設計を実施している。また、SCMによる効率最大化の観点から建設された阿見工場と隣接している総合物流センターは、原料調達・生産・ロジスティクスの全体効率化を達成し、大きな収益効果を挙げている。飲料類の海老名工場もロジスティクスの再編を同時に実施し、効果を挙げることができた。

阿見工場と阿見総合物流センターでは、スマートファクトリー、スマートロジスティクス構築の基盤となる技術要素である設備配置や設備運転の自動化、工場全体を管理制御するシステムを導入している。

また、この工場では、筆者がスマートファクトリーの重要な要素であると考えている生産プランニング、物流プランニング、オペレーションコントロール、生産マネジメント、物流マネジメント、調達マネジメントを効率的にするために、統合的なシステムを構築した。このシステム構成と機能は、本研究で提案している、水平階層型のシステム構成を適用して開発した。このシステム構成により、システム開発費用、運用費用及び製造オペレーションにおける要員効率化に対して大きな効果を挙げている。

現在、稼働から5年を経過し、さらなるスマート化を目指し、工程検査におけるAI技術の導入による自動化とミス低減の実現、IoT導入による設備状態の見える化と故障診断の自動解析、故障の予知解析の実現、ロボティクス技術導入による製造ラインのさらなる自動化とフレキシブル化等の実現に向けて、技術開発と装置開発による設備実施を継続している。

以下に、サッポロビール、日清製粉グループ、江崎グリコ、キッコーマンの同様な設備投資状況の図表を示す。各社とも、雪印メグミルクと同様に設備投資は盛んであり、生産体制整備による効率化、老朽化対応によるプラントのインテリジェント化、労働力不足・労働環境対策のロボティクス化等を実施していることが読み取れる。

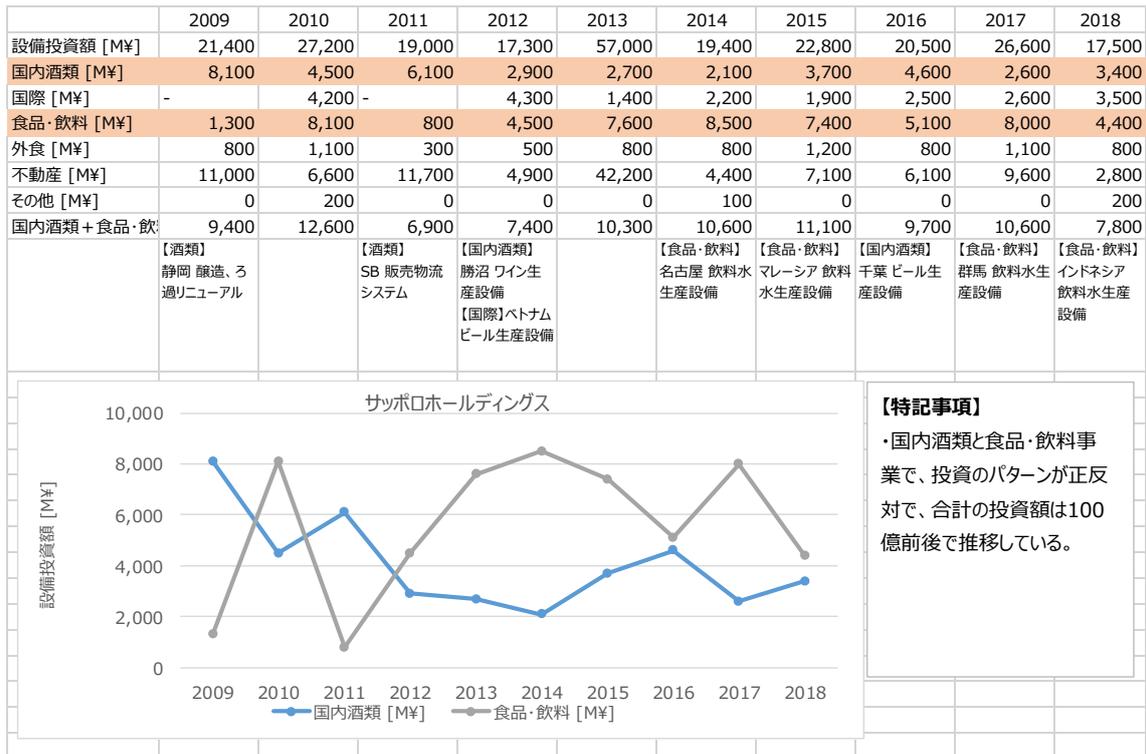


図 1 - 6 サッポロビールの設備投資状況

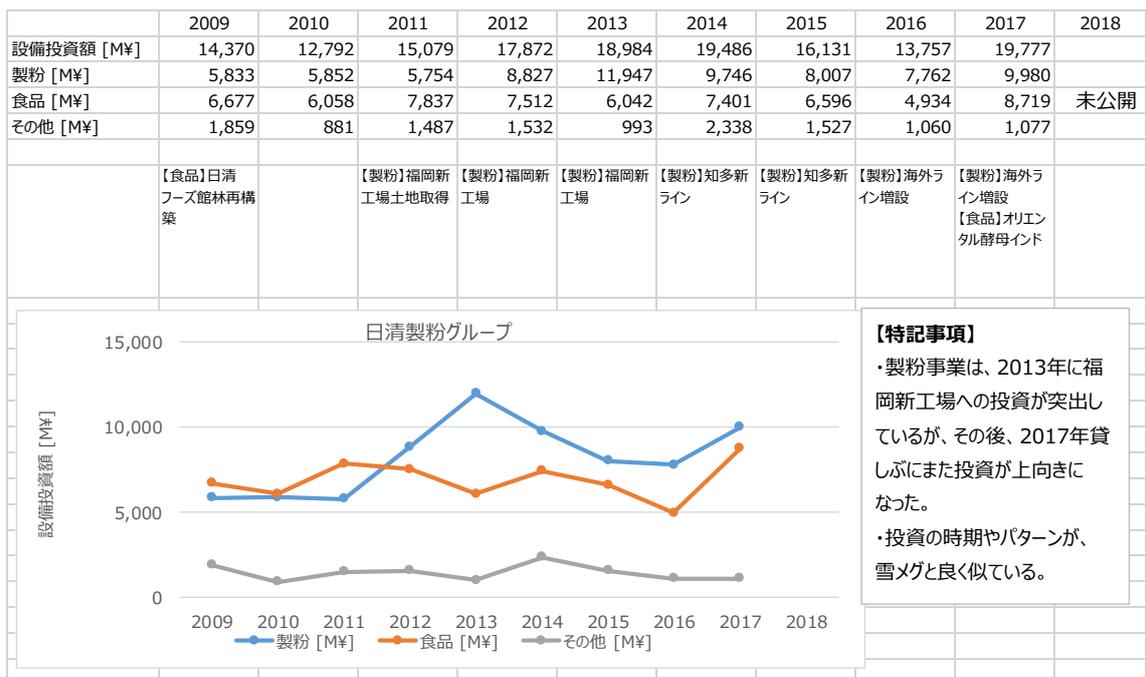


図 1 - 7 日清製粉の設備投資状況

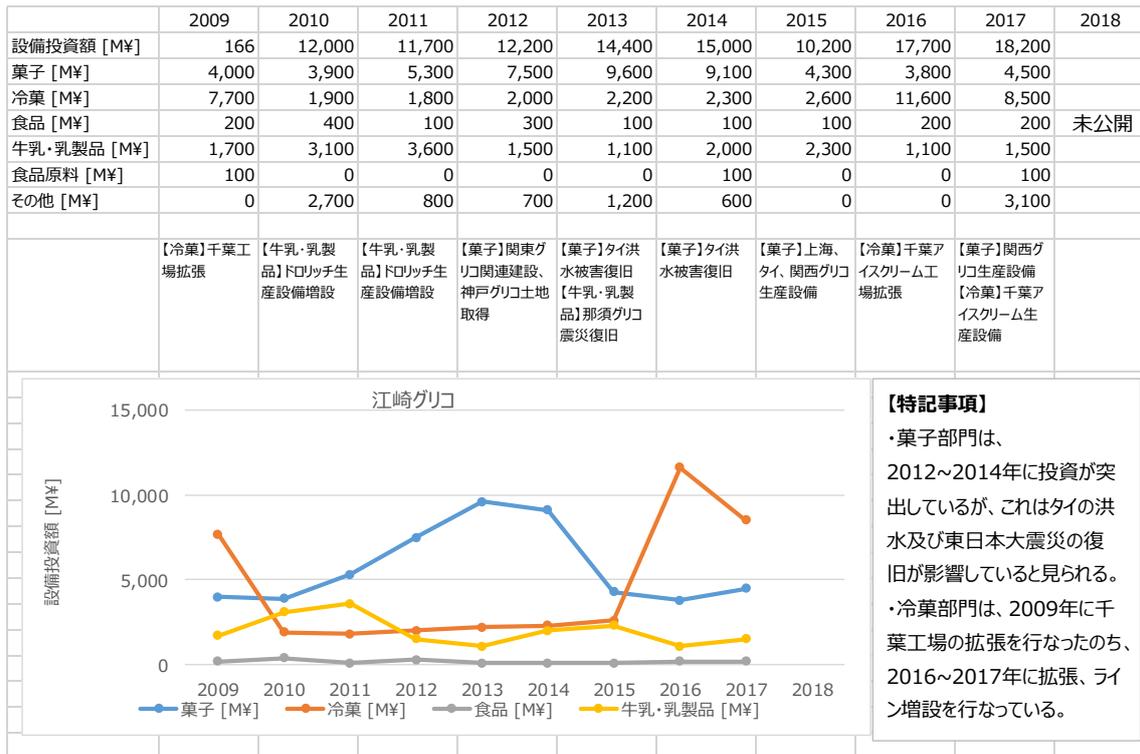


図 1 - 8 江崎グリコの設備投資状況

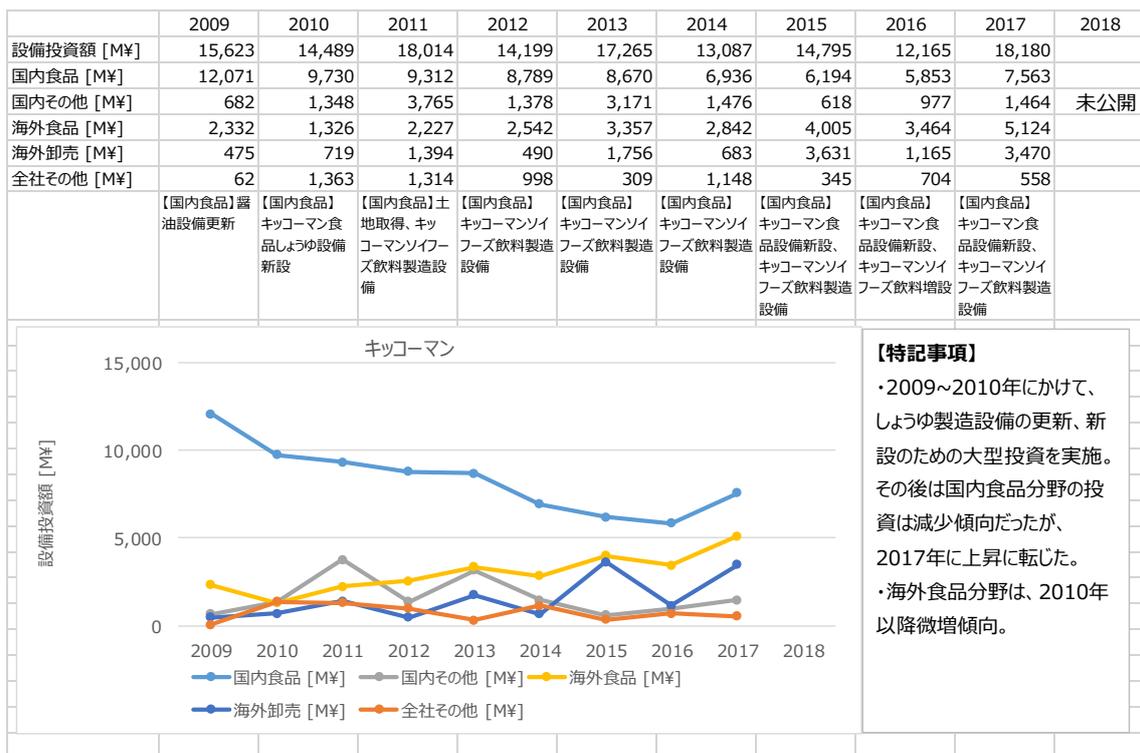


図 1 - 9 キッコーマンの設備投資状況

## 1. 4 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。第1章で背景、目的を述べ、SCM視点でのスマート化に向けた食品産業の特徴として、スマート化に対する食品産業の現状をSCMの視点から調査分析を行なう。その内容は、製品の分類とその特徴を説明し、食品の特徴である製品の日付別管理について、食品ロスの実態と対応及び、食品の物流の現状と対応について述べる。

次に、食品安全性のためのトレーサビリティの確保について、その方法と各事業者での取組について取組事例を入れて述べる。

また、食品産業におけるサプライチェーンの効率化の取組事例として、企業連携とプロセスチーズの市場定着と効率化について述べ、最後に雪印メグミルクを初めとして、主要製造業の設備投資状況について調査を行う。

第2章では、既存研究として、文献レビューと事例分析を行う。文献レビューとしては、インダストリー4.0、スマートファクトリー及びそれらの概念を実現するために必要となるインテリジェントテクノロジーについて文献をレビューする。

また、事例分析はスマートファクトリー構築のために必要不可欠であるSCMの機能の中から、特に重要である需要分析、生産計画の作成について分析し、最後に大手乳業会社の工場、物流センター建設の事例を基に、サプライチェーン視点のスマートファクトリーのランドデザインを分析する。

第3章では、プロセスチーズ工場における2工程ライン設計問題に関する研究として、スマートファクトリーの基本となる、製造工程での設備配置と能力設定の設計について、設備能力の同期化と需要変動に対する柔軟性を考慮した投資決定最適化と運用最適化を求めるモデルを提案し、その解法を示すと共に数値検証を行う。

第4章では、食品工場での水平階層型システムモデルの研究として、プロセスチーズ製造での事例研究を行い、従来の垂直型システムの問題点を述べた上で、スマートファクトリー構築と運用効率化のための、水平階層型システムを提案する。水平階層型システムモデルにおける各システム階層の構成を述べ、機能評価を行い、優位性の検証としてシステム導入及び更新時の費用比較により、水平階層型システムモデルの優位性を確認した。

第5章では、全体のまとめとして、本研究の結論と将来の展望を述べる。

## 第 2 章 既存研究と事例

### 2. 1 はじめに

本章既存研究では、本論文全体に係わる文献レビューとして、インダストリー4.0、スマートファクトリー、インテリジェントテクノロジーについてレビューする。そして、各章の内容と関係の強い既存研究は各章の中で述べることとする。

次に、スマートファクトリー構築のために必須である S C Mの中から、需要分析と生産計画について事例分析を行う。

スマートファクトリーを構築し最適な運用を可能にするためには、サプライチェーン全体が管理されている必要がある。サプライチェーンを管理し最適に運用するためには、S C Mの業務モデルが作成されており、その運用ルールが設定されていることが必須である。そして業務モデルと運用ルールを適切に運用管理する S C Mがシステム構築され、効率的なサプライチェーンの運用が成されていることが必要である。

そして、S C Mによりサプライチェーンが効率的に運用管理されていることが前提で、スマートファクトリーをグランドデザインし、工場のライン設計とシステム設計を行わないと、スマート化の効果は充分には発揮できない。

さらに、スマートファクトリーの運用では S C Mと効率的にシステム連携し、運用最適化を目指すべきである。

本章の事例分析では、S C Mの中でスマートファクトリーの構築と特に関係が重要であるものとして、需要分析として製品需要の傾向分析、販売量評価と販売計画誤差評価のマトリクス分析及び生産計画作成についてそのアルゴリズムを述べる。

適切な需要分析が工場生産するアイテム別にできていないと、生産工場のライン設計時に適切な設備能力と設備台数のライン設計ができない。また、ラインのシステム化と自動化のレベルも適切に設計できず、生産効率化に貢献できない。そのためにも、生産アイテム別に需要分析を事前に実施し、分析されたアイテムグループごとに工場ライン設計とシステム設計をすることにより、需要に適合した効率的ライン設計を可能にする。

そして、S C Mで生産計画作成がより適切に作成されていれば、生産工場のライン設計時にライン稼働をシミュレーションできるため、設計されたラインの妥当性を検証することができる。S C Mの生産計画は平滑化された生産要求量を算出して

立案するため、実際の需要によるライン稼働シミュレーションに対して、精度が良い結果を得ることができる。そして、生産工場のMES (Manufacturing Execution System)等のシステムに連携され、各ライン稼働のプランニングを行うため、欠品防止や過剰生産の防止、生産変更による製品ロスの低減等に対して大きく関与するものである。よって、需要に対して柔軟性を持った生産計画の作成をSCMで行うことは非常に重要である。

また、サプライチェーン全体最適の視点から生産工場がどのような機能と役割を果たすべきかという観点により、スマートファクトリー構築のランドデザインをするべきである。この観点から、サプライチェーン全体である原材料の海外調達と調達物流、生産工場、製品物流のスマート化とスマートファクトリー構築のランドデザインについて、具体例を入れて述べる。

以上より、第2節では文献レビュー、第3節では需要分析の事例分析例、第4節ではSCMによる生産計画作成アルゴリズムの事例分析、第5節ではSCM視点のスマートファクトリー構築のランドデザインについて述べる。

## 2. 2 文献レビュー

スマートファクトリー構築には、インダストリー4.0 の概念を満たすために、スマートファクトリーの関連研究と、製造におけるインテリジェントテクノロジー及び製造管理システムの適用が不可欠である。上記の側面からの関連文献を以下のようにレビューする。

### 2. 2. 1 インダストリー4. 0

インダストリー4.0 という用語は、2016年から日本でも広く認知されるようになった。そして、CPS (Cyber Physical Systems)等の技術を導入し、製造業のインテリジェント化の確立を目指す「第4次産業革命」の先駆概念と見なされている。

インダストリー4.0 の概念では、複数の生産工場が相互接続され効率的に運用されるべきである。そして、これらを統合管理するシステムはCPPS (Cyber-Physical Production Systems)である。そのためのICT (Information and Communication Technologies)による広範な相互接続は、IoT (Internet of Things)のサービスのビジョンと一致している。よって、これらの活用により価値創造のた

めに確立された緊密な統合をサポートし、生産プロセスを制御する新しいメソッドがインダストリー4.0である[52]。

このようなインダストリー4.0メソッドでは、ネットワーク化された製造システムと垂直統合、バリューネットワークを介した水平統合、及び製品のライフサイクルのバリューチェーン全体にわたるエンジニアリングのエンドツーエンドのデジタル統合という3つの次元に沿った統合が特徴である。そして、スマートファクトリーとは、垂直統合が行われるインダストリー4.0の主要な機能であると同時に重要なコンポーネントである。水平統合とは、バリューネットワークを介した複数のスマートファクトリーの統合を指し、スマートファクトリー内部及び異なるスマートファクトリーの両方で発生する。このような垂直統合と水平統合により、バリューチェーン全体でエンドツーエンドの統合が可能になる。そしてスマート製品は、インダストリー4.0のコンセプトを実現するための重要なコンポーネントである。スマートファクトリーでは、製品と機械が相互に通信し、同期を取り協力して生産を推進する。そのためのスマート製品とは、センサーを搭載し、ソフトウェアで制御され、インターネットに接続されているオブジェクト、デバイス、及びマシンを指す[52][53][54][55][56]。

そして、以上のコンポーネントを利用した、人間、オブジェクト、及びシステムの相互接続により、コスト、可用性、リソース効率などの基準を使用して評価及び最適化され、動的でリアルタイムに最適化及び自己組織化された企業間価値創造システムを実現することができる[53]。

インテリジェントマニュファクチャリングでは、デバイスまたはマシンが過去の経験と学習能力に基づいたさまざまな状況と要件に応じて動作を変えることができるようにするための特定の基盤技術が必要となり、これらの技術により、製造システムとの直接通信が可能になる。一部のテクノロジーには人工知能（AI (artificial intelligence)）もある。これにより、製造システムは経験から学習し、接続されたインテリジェントでユビキタスな産業実践を最終的に実現できる[57]。

インダストリー4.0の概念によると、5つの主要な「ビジネスの柱」として、①戦略、②監視と制御、③構造とプロセス、④人事、⑤ITを定義している。この5つの柱のバランスが取れている組織は、平均して市場よりも30%優れているという主張がある[58]。

インダストリー4.0とサプライチェーンとの関連性については、以下の研究が発表されている。

産業界はバリューチェーンにおける最新の技術開発とプロセスの革新を採用するよう求めている。最新の情報技術とインダストリー4.0のイニシアティブを組み合わせることで、分散型製造等のプロセス革新は、産業界でのサプライチェーンに

において持続可能な文化をもたらす[59]。これは、特に発展途上国の製造環境を対象としたビジネスに新しい持続可能性を進化させていく[60]。これに加えて、インダストリー4.0 はサプライチェーンの活動及びサプライチェーン上のビジネスプロセス、業務モデルに大きく影響する可能性がある。そのために、産業システムはサプライチェーン運用の柔軟性を継続的に向上させる機能を組み込む必要がある[61][62]。

インダストリー4.0 における産業システムでは、より優れたデータ交換と制御のための機械、設備、センサー、及び設備のグローバルなCPSのネットワークが開発可能になる。このグローバルなネットワークは非常に柔軟性がありスマート化に貢献できるため、スマートファクトリーとスマート化されたバリューチェーンの構築に貢献する。これにより、各ビジネス方式、材料と機械要件、製品ライフサイクル管理を即座に実行し、SCMとの連携により、ビジネス全体の全体的なパフォーマンスをさらに向上させることができる[63]。さらにインダストリー4.0 は、高度に組織化されたサプライチェーン上の業種間の相互接続を容易にする[64]。

インダストリー4.0 の技術を適用すれば、生産状況、エネルギー消費、材料の流れ、顧客の注文、サプライヤーのデータなど、サプライチェーン上の重要な生産パラメータのリアルタイムのモニタリングと制御が可能になる[62]。インダストリー4.0 の継続的な取り組みは、生産性を向上させ、より高度な管理ができるサプライチェーンを構築するための市場を形成してきている。

そして、インダストリー4.0 はビジネス組織と社会が連動できるような開発を支援する新しいビジネスマインドセットであると想定されている[62]。インダストリー4.0 は将来の最適なサプライチェーン構築であるとも呼ばれており、また、インダストリー4.0 の思想で構築されるスマートファクトリーは、資源や技術などの最適な使用等、様々な継続的な産業界の発展への影響を与える可能性がある[65]。以上のようなことは、サプライチェーンにおけるインダストリー4.0 主導の継続的なスマート化構築の方向性を理解するために、現在の研究を根拠にしている。

また、より高いビジネス利益のためには、管理者がインダストリー4.0 という用語の意味を明確に理解している必要がある[66]。

従って、インダストリー4.0 はその定義のために、さらに機能にフォーカスした研究が必要である。現在、インダストリー4.0 は、今後の継続的なビジネス環境を開発する上での様々な側面と課題を含んでいる[67]。

インダストリー4.0 の導入状況について、組織内からサプライチェーンのパートナーを含んだバリューチェーンにおける導入の達成度を以下のような4段階に定義している[58]。

- ・ レベル1 インダストリー4.0 の概念、アーキテクチャに適応した業務プロセスとサポートシステムがない段階。
- ・ レベル2 部門内レベル、インターフェース共通化によるデジタル変換技術は部門内及び製造現場レベルで処理している。今後はこれらの部門を同期させる情報連携とインダストリー4.0 の概念を検討していく段階。
- ・ レベル3 組織レベル（部門間）、情報連携はビジネス上の問題であると捉えており、部門間全体の統合をするためのビジョンと情報戦略を策定していく段階。
- ・ レベル4 組織間レベル（クロスバリューチェーン及びサプライチェーンパートナー）、インダストリー4.0 を全体的な価値及びサプライチェーンをカバーするビジネス上の問題として見ている段階。

従って、情報連携とインダストリー4.0 のビジョンと戦略を定義するには、バリューとサプライチェーンパートナーの複雑さ及びニーズを考慮する必要がある。

そのために、業務プロセス及び活用方法（ユースケース）は、これらのパートナーとのコラボレーションを可能にするために組織の境界を超えた方法で定義される。これにより、生産や製品に関する適切な意思決定を可能にするために必要な透明性とインテリジェンスが可能になる。

ただしこのレベル定義は、組織的な導入モデルの提案であり、実際各レベルでの連携すべき情報の内容は提示されていない。つまり、導入アーキテクチャのレベル定義にとどまっている。

以上、インダストリー4.0 の思想概念とサプライチェーンとの関連性について文献をレビューしたが、ほとんどは、コンセプト、アーキテクチャ、インダストリー4.0 を構成するコンポーネントについてであり、どのようなものを具現化していくかという事についての研究が見当たらないのが現状である。

また、インダストリー4.0 を具現化していくものが、スマート化、スマートファクトリーの構築であると述べているものが多い。次節でスマートファクトリーについてレビューする。

## 2. 2. 2 スマートファクトリー

スマートファクトリーの機能定義の研究では、動的でありかつ急速に変化する生産に対する外部環境等の条件に対応して、生産活動の問題を解決するために変動する生産条件に対して柔軟で適応性のある生産プロセスを提供する製造ソリューションであると提唱している[11]。

つまり、この定義に基づくとスマートファクトリーではオープン化されたイノベーションエコシステムにより協業するパートナーのシステム統合と業務提携を提供することにより、製造業の能力と技術力が共有化され、個別の製造業の能力、技術と提携している製造業の集合体としての成長と競争力を強化促進していくことに貢献する可能性を持つものである[11]。

また、スマートファクトリーにおける I o T 導入の利点として、エネルギー管理をサポートし、その生産工場のエネルギー効率を向上させることが可能になるとし、生産工場での I o T アーキテクチャと I o T の採用の方法を提示し、I o T とクラウドコンピューティングを利用して仮想マシンネットワークを開発する新しいフレームワークが提案されている[68]。

そして、新世代のスマートファクトリーにおける生産活動は、I o T、クラウドコンピューティング、サービス指向コンピューティング、人工知能、データサイエンスを中心とした C P S の概念を利用しこれらの技術に主導されるという指摘がある[69]。

また、スマートファクトリーでは、工場の内部システムと外部リソースの統合に焦点を当て、工場システムが企業全体システムと統合されていないと製造工場の生産能力が正確に把握できたため、システム統合による適応分野の把握、付加価値を向上させる技術を有効化することは、製造工場の能力を上げ有効に活用するために重要である[7]。そのため、製造業のスマートファクトリー機能には、企業内でシステム統合がなされており、アプリケーション領域、付加価値プロセス、技術の実現に関する視点が含まれている[7]。

スマートリソースを統合することで提供されることが可能になる分散サービスを通じて、スマートファクトリーを制御する方法についての議論では、次のように述べられている。分散サービスに基づいて工場運営をしていくために、工場規模に合致し、マージナル可能な各制御階層を工場に導入することができる。そして、このような工場システムの包括的な設計が研究されている[72]。

また、D S F (digital smart factory) についての研究では、D S F では顧客向けの Web アプリケーションに焦点を合わせ、それらをビジネス及び製造用の Web アプリケーションに接続することで、ビジネス及び生産のパフォーマンスを分析することの意義について言及している [135] 。

そして情報の取得、分析に使用できるスマートファクトリー向けの情報サービス、ミドルウェアのリファレンスアーキテクチャ及び機械、工場、及び製造業のリソース計画レベルでの様々な利害関係者向けのアプリケーションについて提案されている[73]。

この提案は、実際の工場で実用化するために、汎用アプリケーションの提供ができるように、さらに研究とコンポーネントの開発が必要である。

また、スマート化におけるネットワークの在り方として、コラボレーティブネットワークにおける水平統合とエンドツーエンドのデジタル統合、及びスマートファクトリーにおける革新的な生産ネットワークについての解説がある[74]。

スマートファクトリー構築の事例研究として、ドイツの研究プロジェクトは、将来の繊維工場のモデリングに関して適切なモデリングフレームワークを開発したという研究報告がある。このフレームワークでは、設備の構成、完全な生産ネットワークの構築が同様の基本設計構想により構築できることを示している[75]。

以上のように、現在のスマートファクトリーの研究は、主に制御中心の最適化と最新のIT技術を導入するインテリジェント化に焦点が当てられている。そして、より多くの関連するシステムと連携し対話することにより、より優れたインテリジェント化を実現することができることを提示している。よって、スマートファクトリーでは、このようなシステム連携をシームレスに実現し、相互作用を実現することにより、通常の生産設備であっても自己認識や自己学習できるようになっていく[76]。

以上、スマートファクトリー概念、アーキテクチャ、特徴についてのレビューをした。次にスマートファクトリー構築のコンポーネント、運用面についてのレビューをする。

スマートファクトリーへの求められる基本機能とコンポーネントは以下の5つの観点がある[77]。

#### ① スマートネットワーキングシステムと自動化設備

搬送機器、供給資材、設備のスペアパーツ等はスマート化されたアクチュエーターやセンサーを使用し、最新の通信技術とサイバーテクノロジーの活用により、一貫性を持った連携を取ることができる。そして、より高度なレベルのサービスにアクセス可能になり、技術やサービスを活用できることになる。このことは、最適なリソース利用とスマート制御をサポートするビジネスモデルが、構築され、まったく新しいイノベーションを生み出す。

#### ② モビリティ

スマートフォンやタブレットなどのモバイル機器は、すでに産業界でのオペレーションテクノロジーに浸透している。これらは、独立した時間及び場所からの自動化システムのプロセスとサービスへのアクセスを提供することができる。よって、システムによる設備診断、設備保守、設備運用に新しい次元をもたらす。

#### ③ 柔軟性

インダストリー4.0の概念でのスマートファクトリーでは、システム開発、設備診断、メンテナンス、及び自動化された工程の運用の両方で高い柔軟性を実現する。システムの開発では、コンポーネント、モジュール、サービスをシステムベンダーの大規模な資産から最適なものを選択できる。設備診断は、ユーザーが部分的に選択実行できる。これには「ビッグデータ」へのアクセスが有効であり、システム診断情報を必要に応じて取得し、効果的に使用することにより自動診断を実現できる。また、スペアパーツは最も安いメーカーに自動発注が可能となり、要員のスキル不足問題にも対処できる。

#### ④ 顧客の対応

顧客の個々のニーズに合わせて製品をカスタマイズできるようになる。そして、自動化システムは、すべての年齢層のユーザーのニーズと能力に適応する。例えば、最新の券売機は、様々な障害のある人が使用できるように、操作オプションを提供している。よって、あらゆる状況の人々をサポートし、生活の様々な段階で人々を支援する。これはさらに発展しモバイル対応となる。

#### ⑤ 新しい革新的なビジネスモデル

将来の生産はさらに分散され柔軟になる。そして、新しい開発プロセス、インフラ及びサービスが発生する。製品はモジュール化され、各モジュールが構成可能になるため、製品を特定の要件に適合させることができる。ただし、提供されているこれらの製品の信頼性と安全性をどのように判断し、どのように検証するのかという問題がある。

以上の5つの基本機能とコンポーネントは、将来的なものであり実用的な導入事例はまだほとんどなく、その開発は今後の課題である。そのためには、開発メーカーが協力体制を築くことと同様に開発メーカーとユーザー企業の協力体制が非常に重要である。

もう1つの重要な事項は、データの保護とセキュリティの問題であり、ノウハウとプライバシーは保護される必要がある。このため、提供者と使用者の多くのグループとユニットが信頼できる協力体制を可能にする新しい概念と技術が必要となる。さらに、倫理的、法的、社会的問題を再定義する必要も発生する。以上が5つのスマートファクトリーへ求められる基本機能である。

次に、インダストリー4.0の垂直水平統合に対応するためのスマートファクトリーにおける機能条件として通信技術が重要であるとして、以下の要件がある[52]。

垂直水平両方の統合機能の条件は、効率的で手頃な価格のセンサーネットワーク（例えば、無線周波数識別、RFID）が広く利用可能なことである。それに基づいて、マシン、作業リソース、及びアプリケーションシステム間のリアルタイム通信を可能にするインテリジェントまたはスマートオブジェクトとデバイスが作成される。

これらの技術開発は、いわゆるスマートファクトリーで新しい製造プロセスとビジネスモデルを実装するための基盤となる。そして、センサー等からデータを取得して処理できるため、特定のタスクを自己制御し、インターフェースを介して人間と対話できるようになる。

またスマート化のリスクを特定する必要性は以下のとおりである[52]。リスクの特定では、目標の達成を作成、強化、防止、低下、加速、または遅延させる可能性のある事項に基づいて、リスクの包括的なリストを生成することで関連するリスクを特定することが重要である。製造分野では、次の7つに関連する運用リスクが特定できる。①製造プロセス管理、②メンテナンス、③使用されるツールと操作方法、④材料、⑤人的資源、⑥機械及び製造技術、⑦マシン環境。

そして、製造分野の一般的なリスク要因の大部分が情報セキュリティに関連している。それは、製造技術と設備及びロボット技術等は、情報通信技術と統合されていき、そこで重要な問題は、製造システムをサイバー攻撃、データの整合性の損失、または情報の可用性に関する問題から保護する方法である。

スマート化の課題点として、組織、工場におけるスマート化の発展性と脅威について以下のことがある[78]。

ビッグデータ分析、クラウドテクノロジー、サイバーセキュリティ、IoT、電子機器の小型化、RFID、ロボット工学、ドローン、ナノテクノロジー、M2Mは、組織にとっての発展の契機または脅威になる可能性がある。一部の技術が発展性と脅威の両方をもたらす可能性があるという事実は、すべての異なる領域が相互に接続されており、それらの間に明確な境界がなく、分析された場所に応じて、肯定的または否定的な意味合いを持つ可能性があるためである。

また、労働力確保のリスクは以下のとおりである[78]。スマート化は、生産プロセスにおける人間と機械の役割を変えていき、「労働力」の概念の本質を再構築していく。このことは、複雑さが増し、工業製品の知識集約度と知能化は人間の仕事の主なこととなり、より特定の専門性を持つ高度に熟練した専門家が必要になる。今日、専門家の関与の問題は、アウトソーシングまたは一時的な雇用によって解決されているが、彼らの仕事は費用が高く、専門的なスキルと能力を断片的に使用する必要がある。これにより以下のリスクが発生する。

必要な場所で必要な従業員を即座に従事させることができないため、生産が中断する可能性が高くなる、重要事項の漏洩の可能性が増加する、従業員の管理が弱くなり生産プロセスの柔軟性が低下する、これらのリスクは、ビジネスに対する深刻な脅威、つまり労働力の課題を生み出していく。

これらのスマート化に対するリスク対応は重要な課題であり、スマート運用を安全に普及させるためには、さらにリスク対応の研究と実用レベルのアーキテクチャ及びコンポーネントの開発が必要である。

スマート化におけるCPS導入の重要性は以下のとおりである[79]。製造環境でのスマート化には、CPSのさらなる開発と実装が必要であり、これらのシステムを生産、ロジスティクス、サービスと統合すると、産業の変革がもたらされ、CPSは生産に適用されると具体的にはCPPSとして重要な役割を果たす。

これらのシステムは、生産レベルでの各要素であるスマートマシンとスマートファクトリーのための全ての接続を構成しているためである。要約すると、CPSは基本的に、スマートな生産を可能にするインテリジェントネットワークでデータを交換する組み込みシステムとして機能すると説明できる。

さらにCPSと製造環境の統合により、ITシステムの垂直水平統合とサプライチェーン全体の相互接続が可能になり、今日の工場がスマートファクトリーとしてのインダストリー4.0に適合した工場になる可能性がある。

以上、スマートファクトリーについて文献をレビューしたが、そのほとんどがアーキテクチャ、先端ITの活用論、スマートファクトリーに求められる要件等であり、スマートファクトリーを具現化した研究や具体的な機能を示したものは見当たらなかったのが現状である。

## 2. 2. 3 インテリジェント テクノロジー

スマートファクトリーの構築には、先端技術の導入が不可欠である。その中で多くの研究者は、インターネット技術やデータ通信技術、ビッグデータ技術等を重点的に活用してインダストリー4.0の概念によるスマートファクトリーの実用的な構築に焦点を当てている。以下に文献をレビューし、特にCPSとIoTについて詳細な文献レビューをする。

インダストリー4.0の先駆的な取組である、SoS (System of System) によるシステム統合を実装したCPS、IoT、クラウド製造システム、ビッグデータ及び製造関連システムのコンセプトを比較した研究では、CPSが将来の工場で大きな貢献をすることを提示している[80]。

また、IoT技術とIoT活用システムの重要性が提示されている[81]。IoT技術とIoT活用システムは、スマート製造におけるデータ駆動型イノベーションの推進要因であり基盤となっていく。

そして、多くの研究者は主に、情報システムとセンサー、自動化設備等のインテリジェント機器という 2 つの側面から、スマートファクトリーでの先端技術の応用を研究している。

その中で、ビッグデータの観点をサポートするための概念フレームワークが提案されており、提案されたフレームワークにおける一般的で典型的なアプリケーションシナリオの概要が解説されている。ビッグデータからのデータ分析に基づいたスマート製造は、より敏感で、順応性があり、生産状況や設備状況が予測可能になる [82]。ビッグデータに保持されている、製造モニタリングデータから潜在的な基本情報を抽出することにより、実用的な生産と企業の意味決定に役立つガイダンスの提供ができる。そして、システム統合モデルに基づいて、スマートファクトリーの NC 工作機械向けのインテリジェントな監視及びデータ処理システムが開発されている [83]。

また、スマートファクトリーにおける情報システムの構築も研究されている。MES の機能については、工場での情報監視システムにおける 3 つの要素を提示し、MES における製造監視動作モードが提案されている [84]。そして、RFID の活用については、RFID による自動識別システムを導入することにより、人為的要因による番号等の情報入力エラーを回避できる効果が報告されている [85]。また、AGV (automatic guided vehicle) の有効性については、システムと連携した AGV が生産ラインの自動化レベルの向上に有益であることを示した実験結果が報告されている [86]。

以上のほとんどの研究提案は、IT に関するものであり OT や MT 統合すべきものであるが、統合する OT や MT については論じられていない。スマートファクトリー構築には、先端 IT と統合すべき OT・MT を明確にし、それに適合する IT を選択できるようにすることが重要である。

以上のスマートファクトリーに貢献する先端技術の中から、さらに CPS、IoT についてレビューをする。

CPS という用語は 2006 年に米国 N F S が実施した全米科学財団 (NSF) CPS ワークショップでヘレンギルによって提案された。現在 CPS は、米国及びいくつかのヨーロッパ諸国の技術革新の優先リストに含まれている。

CPS の基本的な概念と機能は、サイバネティックな始まりであり、コンピュータハードウェア及びソフトウェア技術、定性的に新しいアクチュエーターを統合し、統合されたそれらの環境に組み込まれ、その変化を認識し、それらに対応し、学び、適応することができるということにある [87]。

コンピュータサイエンスの観点から CPS は、コンピューティングプロセスと工場の実態プロセスの統合である。組み込みコンピュータ、ネットワークモニター、

コントローラーが含まれ、通常はコンピューティングプロセスからのフィードバックがあり、実態プロセスがコンピューティングプロセスの計算に影響を及ぼす[88]。

自動化テクノロジーの観点から見ると、CPSは、実態環境のオブジェクトと構造体に組み込まれたコンピューティング及び通信技術によって各動作が制御される特殊なシステムである[89]。そして、米国NFSによると、将来のCPSは、パフォーマンス、適応性、機器の安定運転、セキュリティ、及び使いやすさにおいて、既存のシステムをはるかに超えるとしている[87]。

CPSの技術的背景について、以下のようなことがある[90]。

- ① 組込プロセッサに基づいた多数のデバイス、その結果データストレージ用のメモリーが増加する。
- ② CPS制御アルゴリズムの品質は、その複雑さと信頼性に影響を与える可能性があり、コンピューティング負荷の強度が増加する。
- ③ システムの応答時間はフィードバック遅延を特徴づける。フィードバックの遅延が大きいほど、該当するオブジェクトの品質管理が悪化する。
- ④ 大規模システムにおける様々な技術トレンドの組合せが発生する。(IoT、スマート環境等)
- ⑤ 情報量の増加に伴い、人間によるシステム管理が必要で、CPS制御の一部を移行する必要が発生する。

さらに、CPSは新しいビジネスモデル、運用コンセプト、スマートコントロールの実現に役立ち、ユーザーとユーザーの個々のニーズに焦点を合わせた、デジタルファクトリーの出現に大きく貢献する[91]。

CPSの拡張については、通常、制御ユニット、センサー、アクチュエーターで構成される組み込みシステムを連携させるためのインターネットまたは同様のネットワークへのインターフェースが必要となる。このシステム連携を達成するためには、現状の開発状況で様々なアプローチが調査されている[92]。

次に、生産に対応したCPSの発展形であるCPPSとは、以下のような機能のものである[93]。CPPSは、プロセスからマシンCPS成熟モデルまでの全ての生産レベル及びシステム全体の環境状況に基づいて接続された自律的かつ協調的な要素とサブシステムで構成されている。CPPS構築の基本的な問題は、自律性、協力、最適化、応答性の関係をどのように探求するかであり、分析的アプローチとシミュレーションベースのアプローチの統合は、これまで以上に重要になると予測できる。そのため、センサーネットワークの運用、大量データ保持と大量データの処理、情報検索の問題に対応する必要がある。

CPPSに導入されたアーキテクチャは、5つのレベルのシーケンシャルワークフロー方式でレベルが構成されており、初期データ取得から分析、最終値の作成ま

でのC P P Sの構築方法を示している。これには、プロセス、マシンまたはシステムレベルの監視の分野からの例もいくつか示されている。C P P Sアプローチにおいては、スマート接続レベル（レベルI）は物理空間を表し、レベルII～IVは「純粋な」サイバー空間を表し、構成レベル（レベルV）はサイバー空間から物理空間へのフィードバックを実現する[94]。

以上のような機能とアーキテクチャを有するC P P Sは、インダストリー4.0の3つの機能の実装がターゲットにされている[95]。それは、①バリューチェーンのネットワークを通じた水平統合、②バリューチェーン全体にわたるエンジニアリングのエンドツーエンドのデジタル統合、③垂直統合及びネットワーク化された製造システムの3つである。

C P P Sは従来の自動化を構成するピラミッド構造を部分的に壊しているが、インダストリー4.0より以前でも、2009年には、産業及び自動化I Tアーキテクチャの常識であった自動化を構成するピラミッド構造が、新しい種類のアーキテクチャにどのように進化しているかが説明されている[96]。

以上のC P S及びC P P Sは、まだ理論レベルであり、今後はフィールドでの実証実験による検証と、実用化に向けたコンポーネントの開発が重要である。

次に、I o Tについてレビューする。現在、我々が行っているコミュニケーションの形態は、人間対人間、または人間対デバイスのいずれかになっている。I o Tは、M2M（Machine to Machine）のコミュニケーションを実現するためにセンサーネットワーク等との組合せでインターネット活用の素晴らしい未来を築くものである[97]。

今後のI o Tのさらなる開発のためには、多数の多層セキュリティアーキテクチャが提案されている。I o Tの3つのキーレベルアーキテクチャの説明[98]、4つのキーレベルアーキテクチャの説明[99]、さらにそれぞれTCP/IP及びTMN（Telecommunication Management Network）モデルに基づいたインターネット及びテレコミュニケーション管理ネットワークのアーキテクチャでの最良の機能を使用した5層アーキテクチャの提案がある[100]。同様に、ネットワーク階層構造に基づいて6層アーキテクチャも提案されている[101]。I o Tの6つの層を以下に示す[97]。

- ① コーディング層：コーディング層は、対象となるオブジェクトの識別を提供するI o Tの基盤であり、この層では、各オブジェクトに一意的IDが割り当てられ、オブジェクトの識別を容易にする。
- ② 知覚認識層：これは、各オブジェクトに物理的な意味を与えるI o Tのデバイスレイヤーである。そしてこれは、RFIDタグ、IRセンサー（赤外線センサー）、オブジェクトの温度、湿度、速度、場所などを感知できる他のセンサ

ーネットワーク等、異なるデータとセンサーで構成されている。この層は、それらにリンクされているセンサーデバイスからオブジェクトの有用な情報を収集し、その情報をデジタル信号に変換してから、さらにアクションを行うためにネットワーク層に渡される。

- ③ ネットワーク層：この層の目的は、知覚認識層からデジタル信号の形式で有用な情報を受信し、Wi-Fi、Bluetooth、イーサネットなどの伝送媒体を通じてミドルウェア層の処理システムに送信する層である。
- ④ ミドルウェア層：この層は、センサーデバイスから受信した情報を処理する層である。
- ⑤ アプリケーション層：この層は、処理されたデータに基づいて、あらゆる業種のIoTのアプリケーションを実現する。アプリケーションはIoTの開発を促進するため、この層はIoTネットワークの大規模開発に非常に役立つ。IoT関連のアプリケーションとは、スマートファクトリー、スマート輸送、スマートホーム等がある。
- ⑥ ビジネスレイヤー：このレイヤーは、IoTのアプリケーションとサービスを管理し、IoTに関連する全ての研究と、効果的なビジネス戦略のためのさまざまなビジネスモデルを生成する。

以上のIoTの6つの階層は、本研究の4章で提案している食品工場での水平階層システムモデルの階層構造にも合致したものとなっている。また、IoTの課題として、以下の理由から標準化の必要がある[102]。

IoTの急速な成長は、標準化を難しくしている。しかし、標準化することは、IoTのさらなる発展と普及のために重要な役割を果たすことになる。IoTの標準化は、新しいサービスプロバイダーとユーザーの参入障壁を低くし、異なるアプリケーション及びシステムの相互運用性を向上させ、より高いレベルでの製品やサービスの向上を目指していくことが可能となる。よって、IoTで使用される様々な標準（例えば、セキュリティ標準、通信規格、及び識別標準）は、IoT技術の普及の鍵となる可能性があり、新たな技術を採用していく必要がある。IoT標準化における特定の問題には、相互運用性の問題、無線アクセスレベルの問題、セマンティックな相互運用性、セキュリティとプライバシーの問題が含まれる。さらに、さまざまなサービスの統合を容易にするために、産業環境でIoTを実装するための業界固有のガイドラインや基準も推奨されている。

本研究では第4章で、IoTを製造工場に導入するためのシステム構成の設計基準を提案している。

製造におけるIoT及びクラウドコンピューティングの技術の応用についての調査研究では、クラウドコンピューティング及びIoTベースによるクラウド製造、

CCIoT（Cloud Computing and Internet of Things）によるサービスシステムとそのアーキテクチャを提案し、そのアーキテクチャはIoT及びクラウドコンピューティング間の関係を分析している。これにより、CCIoTでの製造を実現するための技術システムが確立され、CCIoTでの製造におけるアプリケーションと実装の利点、課題、及び将来の成果についても提示している[103]。

以上、インダストリー4.0 の概念やスマートファクトリー構築に貢献できるインテリジェントテクノロジー、先端技術についてレビューしたが、その代表的な技術論であるCPS、IoTについても、実務への導入事例の分析は少なく、アーキテクチャを述べたものがほとんどである。今後は導入事例について、その効果、有効性、課題を論じ、スマートファクトリーへの技術貢献を推進していくべきものである。

## 2. 3 需要分析（事例分析）

本節では、SCMの基本となる製品需要の分析と製品需要と販売計画の誤差分析を、食品会社のあるカテゴリーの製品群について行う。

### 2. 3. 1 製品需要の傾向分析

大手乳業会社の家庭用プロセスチーズのアイテム別売上累計を図2-1に示す。

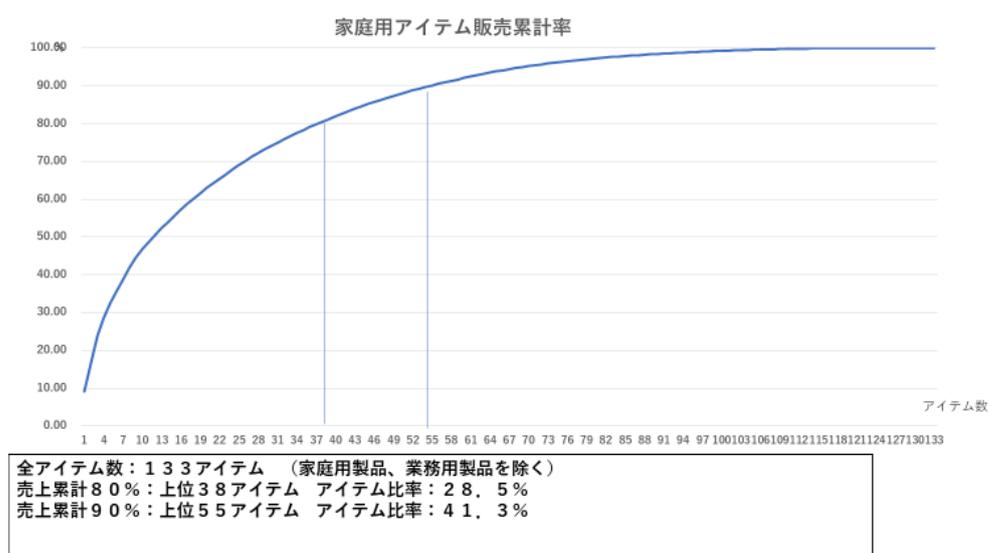


図2-1 アイテム別別販売累計

図2-1は、業務用製品を除いた家庭用製品133アイテムに対する分析である。この図から解るようにプロセスチーズでは、販売量上位30%程度のアイテム、アイテム数38で販売累計は80%以上になっており、販売量上位40%程度のアイテム、アイテム数55で販売累計90%以上になっている。業務用製品を加えると、アイテム数は300以上になるが、業務用製品の販売比率は低いため、上位製品の販売量比率は変わらない。また、ペットボトルのお茶においても同様の分析結果が報告されている[104]。

製造業では、通常この分析による販売量上位約30%販売累計80%までの製品をAランク品、上位30~40%売上累計90%までの製品をBランク品、それ以下の製品をCランク品として捉え、SCMでの販売計画、生産計画作成、在庫管理におけるマネジメント方法、製造ライン設計においてこのように製品群を分類した上で策定していることが重要であり、スマート化にはこれらの要素を加味した製品分析とプラント設計が必要である。

本事例では、アイテム数133に対して、製品形状を決める充填設備種は10種程度になっている。よって、1つの設備に複数の製品が割り当てられている。表2-1に2つの充填機で製造する製品を示す。

表2-1 同一充填設備PとSの製品別販売量と販売量比率、製品ランク  
販売量単位：ケース

充填設備 P				充填設備 S			
製品	販売量	比率	ランク	製品	販売量	比率	ランク
PP1	1313284	9.23	A	PS1	640403	4.50	A
PP2	224257	1.58	A	PS2	425969	2.99	A
PP3	110364	0.78	B	PS3	265172	1.86	A
PP4	82260	0.58	B	PS4	76988	0.54	B
				PS5	20081	0.14	C
				PS6	12996	0.09	C
				PS7	9145	0.06	C
				PS8	5445	0.04	C

この表で解るように、主力製品Aランクに対して、B、Cランク製品が同一設備種にて生産されている。そして設備能力の条件として、販売量の分散値を加味した各アイテムの年間販売量の合計よりも生産能力が上回っている必要がある。生産能

力を確保できていない場合は、製品戦略として、Aランク製品の販売を抑制して、B、Cランク製品を拡販する場合と、B、Cランク製品のアイテム整理をして製品種を減らして生産能力を確保する場合を選択し生産対応する必要がある。また、Cランク製品では、製造1ロットのサイズが出荷期限3分の1ルールの出荷可能日数の販売量より大きい場合は、生産設備を分割してロットサイズを下げるか、該当製品を整理、終売する対策が必要である。

このように、設備の増設や移設計画は各ランクの製品政策をもとにして実施していくべきである。

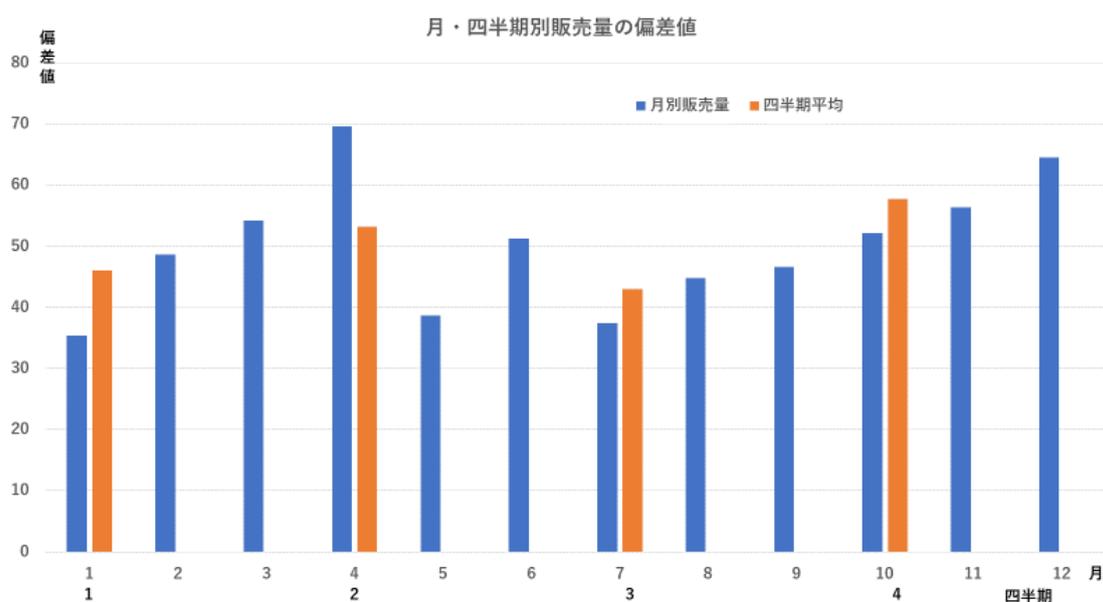


図 2 - 2 月・四半期別販売量偏差値

図 2 - 2 で解るように、乳製品は販売量の季節変動が大きい。通常は、季節変動を、

- 1 - 3月：販売進捗期間
- 4 - 6月：販売高原期間
- 7 - 9月：販売低調期間
- 10 - 12月：販売好調期間

と捉えられている。月別の販売量は、近年バラツキが大きくなってきており、月別での販売管理と生産計画作成が重要になる。

特に、年間販売量を生産能力が満たしていても、販売好調期間において、生産能力が総販売量を満たせない場合は、出荷可能日数を前倒しして、在庫を確保する必要がある。この場合は、出荷可能日付を加味した前期間に次式が成立している必要がある。

## 不足量補充判定式

$$Z(md) + Cd \times D - (St + k\sigma \times D) > Sd + k\sigma \times D \quad (2-1)$$

### ・変数の説明

$Z(md)$  : 補充生産開始日の製品在庫量  
(補充生産開始日:不足期開始日から  $D$  日前)

$Cd$  : 前期間日量生産能力

$D$  : 出荷可能日数

$St$  : 補充生産期間中販売量

$Sd$  : 当期販売不足量

$k$  : 安全係数

$\sigma$  : 日別販売量分散

この関係を解消するための、在庫量確保の設定式として式(2-2)を適用し、SCMで期間中の在庫日数を設定し在庫管理を実施すると、補充する生産計画が策定できる。

## 安全在庫日数設定式

$$Zn = \frac{k\sigma}{\mu} \times \sqrt{T} - (C - S)/\mu \quad (2-2)$$

### ・変数の説明

$Zn$  : 在庫日数

$k$  : 安全係数

$\sigma$  : 日別販売量分散

$\mu$  : 期間中平均販売量

$T$  : 在庫補充間隔

$C$  : 期間中生産能力

$S$  : 期間中販売量

この在庫日数設定式による在庫日数の設定は、年、4半期期間、月ベースで実施し、設備対応、生産対応、販売戦略対応をすることが重要である。

## 2. 3. 2 販売量評価のマトリクス分析

前項では、製品別の販売量の傾向分析と季節変動の分析、それに伴う製造設備と製品割り付けの関係を明確にし、SCMの運用と工場設計時の設備設計考慮点を考察した。また、販売量と生産能力のバランスによる、在庫日数設定式及び生産計画作成について述べた。

本節では、販売量評価マトリクスとして、販売量比率と理論在庫日数の関係を4つのマトリクスに分類し、各象限の特徴と、各象限に属する製品カテゴリーを分析し、販売計画作成、在庫日数の設定、生産計画作成の考慮点について述べることにする。

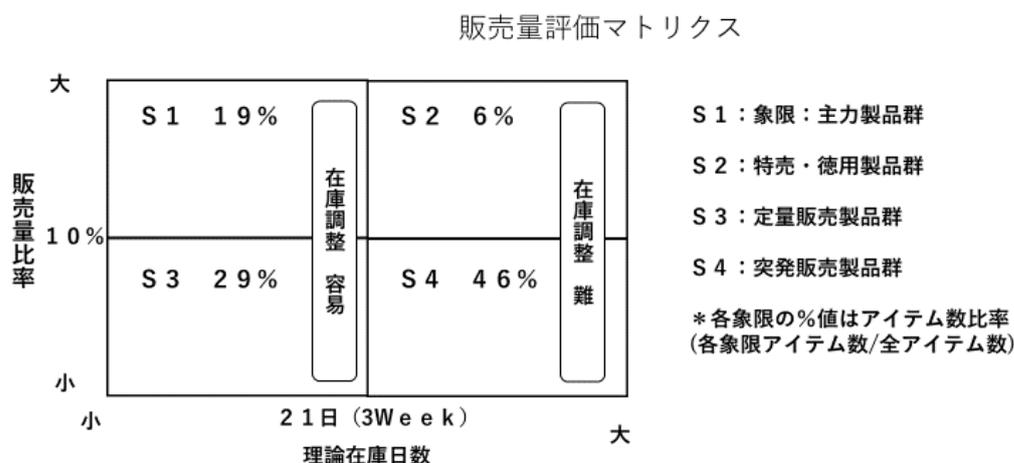


図2-3 販売量評価マトリクス図

図2-3の販売量評価マトリクス図は、販売量比率と理論在庫日数を4象限に分けたマトリクス図である。各象限の振分け値は次のように設定した。前項で販売量構成のABC分析から、製品アイテムをAランク(売上全体の約80%まで)、Bランク(売上全体の約90%まで)、Cランク(A、Bランク以下)に振り分けた。そこで、縦軸の販売量比率の振分け値を、A、BランクとCランクに分けることとし、累計売上高10%と設定した。また、横軸の理論在庫日数振分け値は、全製品の理論在庫日数を算出し中心値であった21日とした。尚、各データ及び象限分類は大手乳業会社の全製品の過去のある年度の販売データより算出、分類したものである。以下に各象限の特徴と属する製品について述べる。

① S 1 象限 アイテム数比率：19%

販売量比率が最も大きいAランク製品群の象限である。ほとんどが家庭用主力品であり、理論在庫日数が小さいということは、 $\sigma$ （販売量標準偏差）が小さく、生産間隔が短いということである。このS 1象限のアイテムは、販売量比率が大きいため、少ないアイテムの在庫制御により全体の在庫削減を達成できる可能性がある。よって、基本的に毎日ハコ型生産を継続することが可能で、設定している在庫水準に基づき、その範囲の中で生産日数を決定していく製品群である。

② S 2 象限 アイテム数比率：6%

主に特売や徳用製品がこの象限に属する。販売量比率は大きい、安全在庫日数計算時の  $\sigma/\mu$ （ $\sigma$ ：販売量標準偏差、 $\mu$ ：平均販売量）も大きく、需要予測が困難な製品群である。アイテム数比率が小さいため、アイテムを絞り込むことが可能である。そして、需要予測の精度を上げることが困難であるため、この製品群は販売先と情報連携し、需要動向を常にモニタリングする必要がある。販売計画を基にした生産計画の精度が大きく影響し欠品防止のための緊急生産等を起こし易く、逆に過剰在庫になる可能性も大きい。スマート化を実現するには、確実な生販調整をSCMで実施し、工場の生産計画システムとの連携が必要であり有効である。

③ S 3 象限 アイテム数比率：29%

販売量比率が小さく、且つ販売数量が安定している製品群である。主に、業務用汎用品がこの象限に属する。この製品群は、 $\sigma$ （販売量標準偏差）が小さく一定の販売量が継続しているため、需要の変化をモニタリングし変化が起こった場合に対応すべき製品群である。販売量が小さいため、生産も通常の設定在庫日数に対応させると生産ロットサイズが小さくなり、製造設備の能力を小さくしなければならない。また、複数の製品をこの製造設備で生産している場合は、生産対応のために複数並列の設備構成が必要となり、工場での製造原価が高くなる。そのため、設定在庫日数に則した生産ではなく、定期間隔に定量生産を実施し、出荷期限在庫量で運用することが全体的効果になる。

④ S 4 象限 アイテム数比率：46%

S 3象限と同様な販売量比率であるが、安全在庫計算時の  $\sigma/\mu$ （ $\sigma$ ：販売量標準偏差、 $\mu$ ：平均販売量）が大きい製品群である。キャンペーン品やプライベートブランド品がこの象限に属する。また、他の象限の製品群と設備を共用している場合が多く、突発的な生産対応にも時間を要する。

この製品群の特徴は大きな販売量の上ブレが不定期に発生しているということである。そのため $\mu$ 値（平均販売量）が大きく、通常期に計算上の安全在庫量を生産すると不良在庫になる可能性が高くなる。また、需要予測の精度上げることも困難であるため、この製品群への対応として有効なことは、大きな上ブレを異常値と

して扱い、 $\mu$  値（補正平均販売量）を設定するとほぼ S 3 象限と同様の設定在庫日数となる。そして、キャンペーン等の販売情報を n 日前に取得できる体制を構築することにより安定した運用が可能になる（n 日前 < 生産対応日数とする）。または、販売量が小さいため、工場の製造負荷とのかねあいで安全在庫量を確保し、不良在庫処分を覚悟した生産体制を実施することも検討すべき製品群である。

S 2 象限、S 4 象限に属する製品では、次の (2-3) 式を適用して、安全在庫日数を設定することが有効である。

#### 突発需要製品 安全在庫日数判定式

$$SD \max / \mu > \frac{k \sigma}{\mu} \times \sqrt{T} \quad (2-3)$$

・ 変数の説明

$SD \max$ ：期間中日別最大販売量

$k$ ：安全係数

$\sigma$ ：日別販売量分散

$\mu$ ：期間中平均販売量

$T$ ：在庫補充間隔

上記式が成立する場合は、 $SD \max / \mu$  を安全在庫日数として設定し、生産計画を立案して、出荷期限切れを覚悟し、欠品防止と生産効率化を優先する。

以上、各 4 象限の特徴と対策を述べた。工場設計では、生産設備能力と個別設備能力を最適に設定することが求められる。よって、前項で述べた季節変動による生産能力の期間不足も考慮して、上記各象限の製品を適確に生産できる生産能力と各設備の設備能力及び設備台数を決定する必要がある。

スマートファクトリー構築には、以上のような製品群別の需要分析を充分に実施し、最適な設備構成と生産計画のシステムロジックを開発することが重要である。

### 2. 3. 3 販売計画誤差評価のマトリクス分析

本分析は、各製品の販売量（週次）のボラティリティである標準偏差の平均値と販売計画（週次）の偏差を平均値（週次）で割った販売計画精度とのマトリクス分析である。

販売計画誤差評価のマトリクス分析

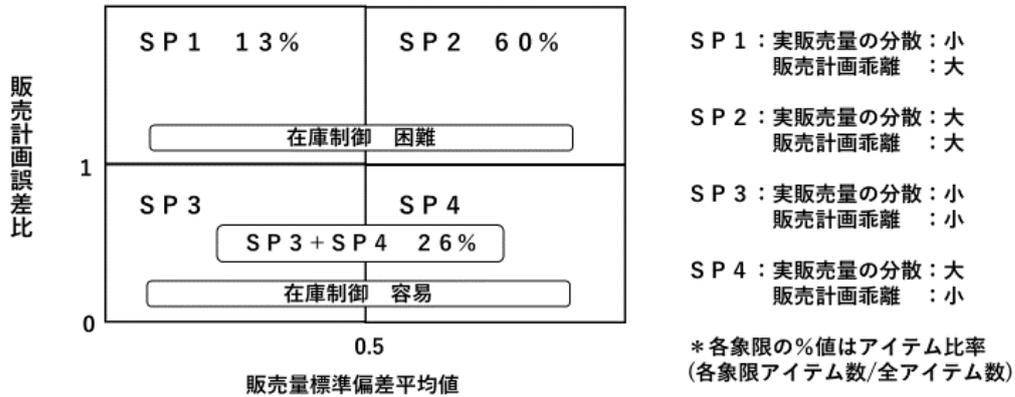


図2-4 販売計画誤差評価のマトリクス分析

図2-4の販売量標準偏差平均値と販売計画誤差比は、次式で求めている。

販売量標準偏差平均値

$$SHA = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2-4)$$

販売計画誤差比

$$SER = (\sigma' / \mu') / (\sigma / \mu) = \sigma' \mu / \sigma \mu' \quad (2-5)$$

・変数の説明

SHA：販売量標準偏差平均値

SER：販売計画誤差比

$\sigma$ ：週別販売量標準偏差

$\mu$ ：週別販売量平均

$\sigma'$ ：週別販売計画量誤差の標準偏差

$\mu'$ ：週別販売計画量平均

各象限の意味は以下の通りである。

① SP1象限 アイテム数比率 13%

実販売量のバラタリティが小さいため、本来は販売計画作成が容易であり、生産計画と製品在庫の制御は容易な製品群ではあるが、販売計画精度が悪いため、在庫

や生産量のコントロールを難しくしている製品群である。この象限の製品は、前に述べた販売量管理の評価マトリクス分析でS3象限の製品と重複が多く、本来は販売計画精度が上げられるものであるが、販売期間が短い、販売数量が小さい等により販売計画誤差が大きく出ているものである。需要予測システムの導入により、最適な予測モデルが選択できると販売計画誤差精度は大きく改善できるものである。

② SP2象限 アイテム数比率 60%

実販売量のボラタリティが大きいため、本来は販売計画精度を確保するのが難しい製品群である。販売量管理の評価マトリクス分析でS2、S4象限の製品が混在している。対応としては、販売促進情報管理、流通業との情報連携による販売情報の取得を定例化し販売計画値の精度を向上させる必要がある。需要予測システムを導入しても、一定期間ごとのパラメータチューニングや販売情報による予測値変更等が必要になる。

③ SP3象限 アイテム構成比（SP4と合計） 26%

SP1象限と同様に実販売量のボラタリティが小さいため、本来は販売計画作成が容易な製品群であり、実際の販売計画誤差も小さくなっている。この象限の製品群は、生産計画、在庫量のコントロールがやり易く、実際コントロールが出来ている製品群である。販売量管理の評価マトリクス分析でS1、S3象限の製品が混在している。販売計画作成の方式を需要予測システムに反映させると需要予測システムによる販売計画作成が可能になる。

④ SP4象限

実販売量のボラタリティが大きいため、本来は販売計画精度を確保するのが難しい製品群である。販売量管理の評価マトリクス分析でS2、S4象限の製品が混在している。しかし、販売計画作成の方式、ルール化がなされており、販売計画誤差は小さく抑えられている。需要予測システムでも、現在の販売計画作成の方式やルールをモデル化することにより、需要予測システムによる販売計画作成が可能になる。

以上、需要分析についての事例分析を行った。需要動向の適切な分析は、生産計画作成、工場設計時の設備能力と台数設計等、スマート化の前提となるものである。

## 2.4 生産計画の作成（事例分析）

生産計画作成が適切にシステム化されていることは、スマートファクトリーにおける工場運用の核である。また、生産計画作成システムはライン設計時のシミュレ

ーション機能としても非常に重要で有効である。本節では、事例分析として、保有在庫日数の算出、生産要求量の算出、生産計画数量の算出について、各方式と算出アルゴリズムを述べる。

## 2. 4. 1 保有在庫日数の算出

在庫日数は平均販売量の算出期間（年、月等）、算出時期（1 - 3月期、9 - 12月期等）等により算出値が異なる独立した変数である。

これに対して、保有在庫日数とは保有在庫日数計算日の在庫量が保有在庫日数計算日から向こう何日分の販売量を確保しているかという日数とする。よって、生産と販売の受払に連続的に追従した変数となる。

在庫日数と保有在庫日数の算出式は以下の通りである。

**在庫日数**

$$Z_n = Z(md) / \mu \quad (2-6)$$

**在庫保有日数**

$$0 > Z(md) - \sum_{i=1}^n SP_i \quad (2-7)$$

\* 保有在庫日数計算日を 1 として販売量を計算する

### • 変数の説明

$Z_n$  : 在庫日数

$Z(md)$  : 保有在庫日数計算日在庫量

$\mu$  : 平均販売量

$SP_i$  :  $i$ 日の販売量

$md$  : 保有在庫日数計算日

$n$  : (2-7) 式が成立した最小値

\* 上記 (2-7) 式が成立した  $n$  の最小値から 1 を引いたものが保有在庫日となる。

在庫日数による管理の場合は、在庫日数が設定在庫日数となるように生産と在庫量を管理する。この場合特に、突発的上ブレ販売量が発生する製品で（2 - 3節の需要分析における販売量評価マトリクス図の S 2、S 4 のアイテム群）突発的異常値を排除した平均販売量を  $h$  とした場合、[在庫日数 × 平均販売量 /  $h$  > 納品期限] となると不良在庫のリスクは非常に大きくなる。また、[上ブレ量 - 平均販売量 > 在庫日数 × 平均販売量] となると、予期せぬ欠品のリスクが大きくなる。

これに対して、保有在庫日数管理では、設定在庫日数を基準とはするが、日々の在庫日数の変動を追従管理しているため、販売計画と保有在庫日数の推移により突発的販売量が検知することができる。上ブレ検知日は、 $[n \text{ 日前} = (\text{上ブレ量} - h) / h]$  となり、事前に  $[\text{上ブレ量} < (\text{生産量} / \text{日}) \times \text{生産確保日数}]$  を満たせば欠品しない、出荷期限を過ぎないという在庫量の範囲で生産制約との関連性を考慮してコントロールすれば良いことになる。後述の生産計画立案での在庫日数は、上記の保有在庫日数としている。

表 2-2 に在庫日数と保有在庫日数の比較表を示す。尚、この表の在庫日数 1 は在庫日数の計算の分母となる平均販売量を期間平均値としている。また、在庫日数 2 は在庫日数の計算の分母となる平均販売量を年間平均値としている。

表 2 - 2 在庫日数比較表

日付	曜日	入庫	出庫(計)	在庫数	保有在庫日数	在庫日数1	期間平均値	在庫日数2	年間平均値
1	金		1387	5163	4	2	1954	1	3047
2	土	1618	3545	3236	4	1	1954	1	3047
3	日			3236	3	1	1954	1	3047
4	月			3236	2	1	1954	1	3047
5	火	10610	1297	12549	8	6	1954	4	3047
6	水	3932	1754	14727	9	7	1954	4	3047
7	木		1547	13180	8	6	1954	4	3047
8	金	3067	1379	14868	9	7	1954	4	3047
9	土	274	2175	12967	9	6	1954	4	3047
10	日			12967	8	6	1954	4	3047
11	月	4447	1783	15631	9	8	1954	5	3047
12	火	3909	1465	18075	10	9	1954	5	3047
13	水	2948	1965	19058	12	9	1954	6	3047
14	木	2898	1988	19968	13	10	1954	6	3047
15	金	2421	1554	20835	13	10	1954	6	3047
16	土		2175	18660	12	9	1954	6	3047
17	日			18660	11	9	1954	6	3047
18	月	4982	1778	21864	11	11	1954	7	3047
19	火	4940	1413	25391	15	12	1954	8	3047
20	水	4204	1961	27634	16	14	1954	9	3047
21	木		1739	25895	15	13	1954	8	3047
22	金		1515	24380	14	12	1954	8	3047
23	土	3093	2240	25233	15	12	1954	8	3047
24	日			25233	14	12	1954	8	3047
25	月	2912	1836	26309	15	13	1954	8	3047
26	火		1472	24837	14	12	1954	8	3047
27	水		2035	22802	13	11	1954	7	3047
28	木		2042	20760	12	10	1954	6	3047
29	金		1665	19095	11	9	1954	6	3047
30	土		4661	14434	10	7	1954	4	3047
31	日			14434	9	7	1954	4	3047
1	月			14434	8	7	1954	4	3047
2	火		1672	12762	7	6	1954	4	3047
3	水		2345	10417	6	5	1954	3	3047
4	木		2250	8167	5	4	1954	2	3047
5	金		1834	6333	4	3	1954	2	3047
6	土		2435	3898	3	1	1954	1	3047
7	日			3898	2	1	1954	1	3047
8	月		2040	1858	1	0	1954	0	3047
9	火		1567	291	0	0	1954	0	3047

## 2. 4. 2 生産計画立案の流れ

生産計画の作成単位は、製造工場の各エリア単位、日単位とする。エリアとは、複数の共通設備を持ち類似アイテム群を製造する工場での場所区分である（例、スライスチーズ充填包装エリア等）。図2-5 生産計画作成の流れのように、各エリアに割り当てられたアイテム群の各アイテム別に工場の出荷要求量・生産要求量を算出し、生産制約条件を満たす生産計画数量を作成する。

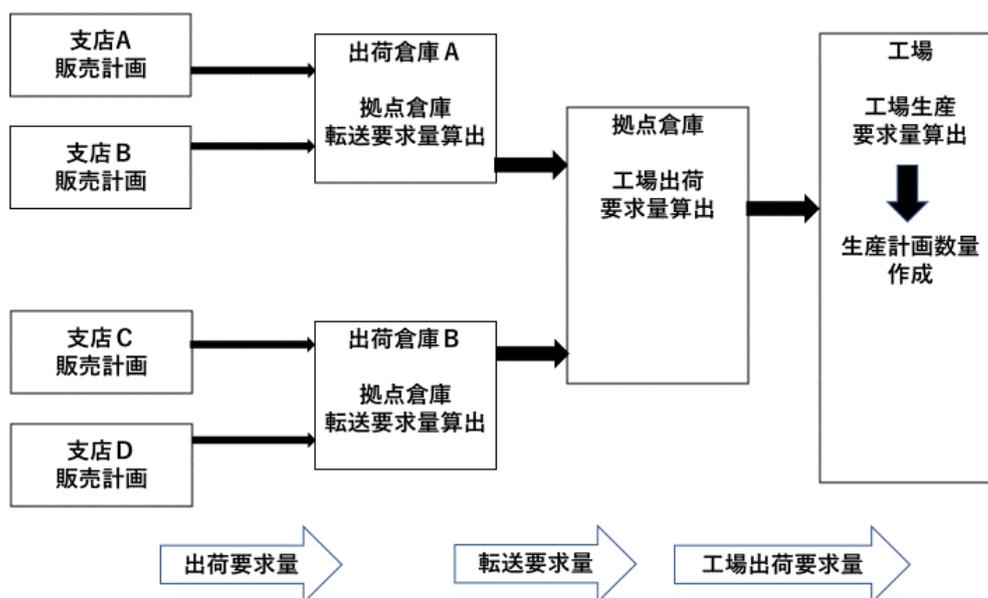


図2-5 生産計画作成の流れ

## 2. 4. 3 出荷要求量と生産要求量の算出方法

### (1) 出荷要求量と生産要求量の算出の基本的考え方

工場生産要求量は、営業支店の販売計画から出荷要求量、転送要求量、工場出荷要求量を算出して工場生産要求量を求める。基本的な考え方は、次の通りである。

工場出荷要求量・工場生産要求量算出のアルゴリズムは、各営業支店の日別アイテム別の12週分(任意に設定可)の販売計画と直近の在庫実績を基にして、工場で生産すべき数量を求め、生産要求量とするものである。営業支店から工場の間には、拠点倉庫と出荷倉庫の階層構造が介在することが多く、今回の事例でも、出荷倉庫から出荷すべき量、拠点倉庫から出荷すべき量を段階的に求めて最終的に工場から出荷すべき量を求め、工場出荷要求量とすることが現実に即している。

さらに、各出荷拠点間の輸送・出荷リードタイムを考慮することが必要となる。このリードタイム設定には、営業日カレンダーに基づいた休日の考慮が必要である。例として、出荷リードタイムが2日で月曜日納品では、土日曜日が休日の場合、前週金曜日がリードタイムとして算出されるようにする。

工場生産要求量算出(工場別・アイテム別・日別)の計算は以下の手順とする。また、工場生産要求量の算出には工場での製造日は考慮しない。そして、現在の在庫は将来に渡り有効在庫であることを前提とする。(出荷期限内出荷が可能)。

### 工場生産要求量の算出のステップ

STEP1 次のようにリードタイムの設定を行う。

$L1$  : 工場検査リードタイム

$L2$  : 工場→拠点倉庫輸送リードタイム

$L3$  : 拠点倉庫→出荷倉庫輸送リードタイム

$L4$  : 受注リードタイム (在庫計上してから出荷までの日数)

STEP2 出荷倉庫に割当てられた各支店のリードタイムを加味した販売計画量を合算し、これを出荷倉庫の出荷要求量とする。

STEP3 出荷倉庫の出荷要求量よりリードタイムを加味した出荷倉庫在庫量を引き、拠点倉庫から出荷倉庫への転送要求量を算出する。

STEP4 拠点倉庫に割当てられた各支店のリードタイムを加味した販売計画量を合算し、拠点倉庫からの出荷要求量を算出し、各出荷倉庫への転送要求量と出荷要求量の合算値から拠点倉庫の在庫量を引き、拠点倉庫転送要求量を算出する。

STEP5 リードタイムを加味した各拠点倉庫の拠点倉庫転送要求量を合算して、工場出荷要求量を算出する。

STEP6 生産対象工場では、検査リードタイムを加味した工場出荷要求量から工場在庫量を引いたものを計画日の工場生産要求量とする。

## (2) 各要求量作出式

① 出荷倉庫転送要求量 (拠点倉庫→出荷倉庫転送要求量)

$$FT(LS3) = \sum_{i=1}^{BT} SP(LS1)_i - (ZF(LS4) - \sum_{i=1}^{BT} \sum_{j=LS3}^{LS2} SP(j)_i) \quad (2-8)$$

$$LS1 = md + L1 + L2 + L3 + L4 \quad (2-9)$$

$$LS2 = md + L1 + L2 + L3 + L4 - 1 \quad (2-10)$$

$$LS3 = md + L1 + L2 + L3 \quad (2-11)$$

$$LS4 = md + L1 + L2 + L3 - 1 \quad (2-12)$$

・変数の説明

$FT(LS3)$  : 計画日にリードタイムを足した日付の出荷倉庫転送要求量

$SP(LS1)_i$  :  $LS1$ 日の  $i$ 支店の販売計画量

$ZF(LS4)$  : 転送在庫日前日の在庫量

$SP(j)_i$  :  $j$ 日の  $i$ 支店の販売計画量

$LS1$  : 出荷倉庫転送要求量の販売日

$LS2$  : 前日の出荷倉庫転送要求量の販売日

$LS3$  : 転送要求量の転送在庫日

$LS4$  : 前日の転送要求量の転送在庫日

$BT$  : 支店数

$md$  : 計画日

$L1$ 、 $L2$ 、 $L2$ 、 $L4$ は前述の各リードタイムである。

\* 本日から計画日前日までの在庫量 ( $ZF(LS4)$ ) は、リードタイムを加味した (リードタイム:  $LS2$ ) 販売計画量と転送要求量 (リードタイム:  $LS4$ ) に対する実績値に誤差が発生しないものとして、受払計算で求める。

② 拠点倉庫転送要求量 (工場→拠点倉庫転送要求量)

$$MT(LM3) = \sum_{i=1}^{WT} FT(LS3)_i + SM(LM1) - (ZM(LS4) - \sum_{j=LM3}^{LM2} SM(j)) \quad (2-13)$$

$$LM1 = md + L1 + L2 + L4 \quad (2-14)$$

$$LM2 = md + L1 + L2 + L4 - 1 \quad (2-15)$$

$$LM3 = md + L1 + L2 \quad (2-16)$$

$$LM4 = md + L1 + L2 - 1 \quad (2-17)$$

・変数の説明

$MT(LM3)$  : 計画日の拠点倉庫転送要求量

$FT(LS3)_i$  :  $LS3$ 日の  $i$ 出荷倉庫の転送要求量

$SM(LM1)$  :  $LS1$ 日の拠点倉庫の販売計画量  
 $ZM(LM4)$  : 計画日前日の転送要求量の転送在庫日の在庫量  
 $SM(j)$  :  $j$ 日の拠点倉庫の販売計画量  
 $LM1$  : 計画日の転送要求量の販売日  
 $LM2$  : 計画日前日の転送要求量の販売日  
 $LM3$  : 計画日の転送要求量の転送在庫日  
 $LM4$  : 計画日前日の転送要求量の転送在庫日  
 $WT$  : 出荷倉庫数  
 $md$  : 計画日

$L1$ 、 $L2$ 、 $L2$ 、 $L4$ は前述の各リードタイムである。

\* 本日から計画日前日までの在庫量 ( $ZM(LM4)$ ) は、リードタイムを加味した (リードタイム :  $LM2$ ) 販売計画量と転送要求量 (リードタイム :  $LM4$ ) に対する実績値に誤差が発生しないものとして、受払計算で求める。

### ③ 工場出荷要求量

$$PT(LP) = \sum_{i=1}^{MWT} MT(LM3)_i \quad (2-18)$$

$$LP = md + L1 \quad (2-19)$$

#### ・変数の説明

$PT(LP)$  : 計画日に検査リードタイムを足した日の工場出荷要求量  
 $MT(LM3)_i$  :  $LM3$ 日の  $i$ 拠点倉庫の転送要求量  
 $LP$  : 計画日に検査リードタイムを足した日付  
 $MWT$  : 拠点倉庫数  
 $md$  : 計画日

### ④ 工場生産要求量

$$PR(md) = PT(LP) - ZP(LP1) \quad (2-20)$$

$$LP1 = md + L1 - 1 \quad (2-21)$$

#### ・変数の説明

$PR(md)$  : 計画日の工場生産要求量  
 $ZP(LP1)$  : 計画日に検査リードタイムを足した前日の工場在庫量  
 $LP1$  : 計画日に検査リードタイムを足した前日  
 $md$  : 計画日

\* 在庫量 ( $ZP(LP1)$ ) については計画日から  $LP1$  まで、工場出荷要求量に誤差が発生しないものとして受払計算で求める。

## 2. 4. 4 生産計画数量の作成方法

### (1) 販売計画と需要の誤差に対する対応

次に述べる生産計画数量算出のために、販売計画の誤差を考慮した販売計画誤差補正値を、以下のように設定する。

- ① 販売計画誤差率： $SPer$

$$SPer = (\mu' + k\sigma) / \mu \quad (2-22)$$

- ② 上振れ販売計画補正値： $SPu$

$$SPu = SP \times (1 + (\mu' + k\sigma) / \mu) \quad (2-23)$$

- ③ 下振れ販売計画補正値： $SPd$

$$SPd = SP \times (1 - (\mu' + k\sigma) / \mu) \quad (2-24)$$

・変数の説明

$SP$ ：販売計画値

$\mu'$ ：販売計画と販売実績の差の平均値の絶対値

$\sigma$ ： $\mu'$ の標準偏差

$\mu$ ：販売計画平均値

$k$ ：安全係数

以上の販売計画補正値を使用して、前節で述べた出荷要求量から工場生産要求量を、販売量が上振れした場合と下振れした場合で計算する。

### (2) 生産計画数量の作成の基本的考え方

生産計画数量は、需要に応じて必要なアイテムを必要数量生産する計画作成が望ましい。よって、前節で述べたように各リードタイムを加味して川下からの出荷要求量を在庫に引き当てて生産要求量を決定していくアルゴリズムとしているが、実際の需要は販売計画と需要の誤差が発生する。そこで、生産アイテム決定と、生産計画数量の決定は、以下に述べるアルゴリズムとする。

- ① 需要の変化（上振れ）による欠品回避の生産アイテムの選択

販売計画に対して、需要が上振れした場合に欠品リスクが大きくなる。そこで、販売計画に対して需要が上振れするという想定で工場生産要求量を算出し、現在庫から欠品予定日を算出する。そして、設定した工場エリアにおける欠品予定日の早いアイテムから順番に生産計画を作成するというロジックにより、需要変動の欠品リスクを最小限に抑えることとする。

## ② 需要の変化（下振れ）による出荷期限切れ在庫の回避

上記とは逆に、販売計画に対して需要が下振れした場合は、出荷期限までの工場生産要求量を生産してしまうと、出荷期限切れ在庫の発生リスクが大きくなる。そこで、出荷期限日から生産計画日までの工場生産要求量を販売計画下振れ補正值にして、この下振れ工場生産要求量を最大生産量とする。これにより、出荷期限切れの在庫発生リスクを最小限に抑えることができる。

### （3）生産数量計画作成のパラメータ

#### ① 最小確保日数

アイテム別に工場での生産サイクル、製造ロットサイズにより生産効率を考慮したパラメータで、製造ロットに在庫日数の考え方を付加したものである。

これは、生産数量を決定する際に、最小でも工場生産要求量の  $n$  日分を満たす生産計画数量とするための日数設定であり、これを最小確保日数とし、日数は任意に設定する。

最小確保日数は、生産の効率化と生産時に在庫を確保するために設定する。工場生産要求量が小さいアイテムについては、この最小確保日数の設定により複数日分の工場生産要求量の生産を行うことになるため、生産効率化に貢献できる。ただし、このパラメータは該当アイテムが生産するアイテムとして選択された際に適用されるため、各アイテムの在庫が必ず確保されていることは保証できない。

#### ② 最大許容日数

アイテムごとの生産量を決定する際、生産量による在庫過多を防止するために、一定量の在庫が確保されている場合は、生産数量を制限する必要がある。この制限された生産数量に対する在庫日数の上限値を最大許容日数とする。つまり、計画日から最大何日分までの生産要求量に対して生産して良いかを示す日数である。最大許容日数は、出荷期限日数を下振れ販売計画補正值によって補正した日数とする。計算方法は、出荷期限日数に下振れ販売計画補正值を掛けて補正日数を算出し、これを理論最大許容日数とする。また、任意にこの日数設定できる機能も持たせることとする。これにより、箱型生産アイテムや販売計画誤差の小さいアイテムは適正な確保在庫日数を任意に設定できることになる。実際の生産数量決定では、理論最大許容日数と設定最大許容日数の小さい方をパラメータとして採用する。

#### ③ 生産ロットとロットきざみ量

生産ロットとは、各製造ラインにおける各アイテムの最低の生産数量とする。ロットきざみ量とは、生産ロットに対して生産数量を増加させる数量単位とする。これらは、製造設備の能力制約、各アイテムの原材料配合制約等から任意に決定する。

#### (4) 生産計画日に生産するアイテム選定

生産計画日に生産するアイテムは、欠品のリスクを最小限に抑える必要があるという考え方から、欠品予定日の早いアイテムから順に生産を計画する。また、最早欠品予定日が同一の場合は、本来付加価値の高いアイテムを優先させるべきであるが、これは等しいとみなし、工場生産要求量の大きいアイテムから選択することとする。

欠品予定日は以下の式が成立した日付とする。つまり、(2-31)式が成立する  $n$  値の最小値である。

・最早欠品予定日算出式

$$0 > Z(today) - \sum_{i=today}^n PR(i) \times (1 + (\mu' + k\sigma)/\mu) \quad (2-31)$$

・変数の説明

$Z(today)$  : 本日の在庫量

$PR(i)$  :  $i$ 日の生産要求量

$\mu'$  : 全国合計販売計画と全国合計販売実績の差の平均値の絶対値

$\sigma$  :  $\mu'$ の標準偏差

$\mu$  : 全国合計販売計画平均値

$k$  : 安全係数

#### (5) 生産計画日のアイテム別生産数量の算出

##### ① 生産数量算出の考え方

(4)の手順と算出式で、生産計画日に生産すべきアイテムが決定されたら、対象アイテムの生産すべき数量の算出を行う。生産数量の決定には、必要な工場生産要求量を満たす生産数量を生産することとし、基本的には、1日分の工場生産要求量を生産数量として割り当てていく。これにより、必要な生産数量を生産することになる。

また、需要の下振れによる出荷期限切れ在庫を持つリスクを最小限にするために、前述の最大許容日数を生産アイテム別に算出し、この在庫日数を超えない生産数量とする。

そして、生産の効率化を図れるように、生産最小ロット及び前述の最小確保日数を満たす生産数量を最小限の生産数量とすることで、生産ラインの効率的運転が可能となる。

工場の対象エリアにおいて、生産計画日の生産能力に余裕があり、需要下振れ対応に対して生産可能なアイテムがあれば、最大許容日数を超えない範囲で設備の最大能力までの生産数量を割り付ける。生産可能なアイテムを早く生産しておくこと

で、突然の需要発生による欠品防止及び年末等生産能力を超えてしまう工場生産要求量に対しての対応が可能となる。

アイテム間に在庫日数の偏りが発生することを抑制するために、1日ごとの工場生産要求量で生産を実施し、製品の選択を繰り返すようにする。これにより、特定のアイテムが欠品になることを防止する。

そして、生産制約として、各製造ラインの生産ロットとロットきざみ量単位で生産数量を決定する。

## ② 需要下振れに対応した最大生産数量の算出

需要下振れに対応した最大生産数量は、出荷期限切れ在庫を最小限に抑えるものとする。つまり、前述の下振れ販売計画誤差率を工場生産要求量に適用して最大許容日数を算出する。この最大許容日数までの工場生産要求量を最大工場生産要求量として、生産計画日の生産数量を決定する。

算出式は以下の通りとなる。

- ・最大許容日数

$$NDmax = N \times (1 - (\mu' + k\sigma) / \mu) \quad (2-32)$$

- ・最大生産量

$$PQmax = \sum_{i=md}^{NDmax} PR(i) - Z(md) \quad (2-33)$$

- ・変数の説明

$NDmax$  : 最大許容日数

$N$  : 出荷期限日数

$\mu'$  : 全国合計販売計画と全国合計販売実績の差の平均値の絶対値

$\sigma$  :  $\mu'$ の標準偏差

$\mu$  : 全国合計販売計画平均値

$k$  : 安全係数

$PQmax$  : 最大生産数量

$PR(i)$  :  $i$ 日の工場生産要求量

$Z(md)$  : 計画日の在庫量

$md$  : 計画日

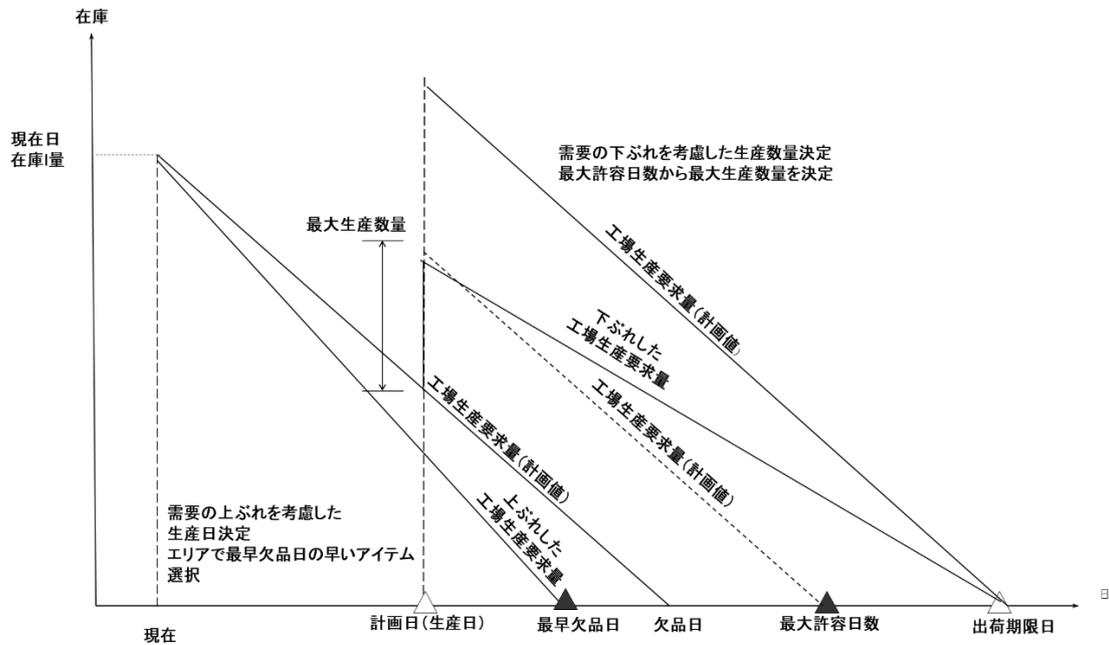


図 2 - 5 生産日決定と最大生産数量決定の関連図

図 2 - 5 で示すように、販売計画誤差率を使用した、上振れ工場生産要求量と下振れ工場生産要求量による工場生産要求量の補正によって、生産計画日と最大生産数量の決定をする。最小確保日数は前述のとおり、このアルゴリズムとは別に、製造ライン制約、生産ロットサイズ等により、任意に設定されているものとする。

#### (6) 製造ラインの生産数量決定例

(5) で算出されたアイテム別生産数量に対して、製造ラインの生産ロットサイズとロットきざみ量を適用して生産数量を決定する。

実際の生産数量決定は、以下の手順で実施する。

STEP1 生産するアイテムの選定

STEP2 生産するアイテムの生産数量算出

STEP3 生産ロットとロットきざみ量の適用

この事例では、1日の工場生産要求量が基本的には生産ロットより小さいアイテムを選択して手順の説明をする。なお、選定除外アイテムとして以下のものとする。

- ・ エリア内で同一日に生産不可のアイテム
- ・ 最大許容日数までの工場生産要求量が0個のアイテム
- ・
- ・ 生産可能日が曜日指定等で当日に該当しないアイテム

表 2 - 3 に生産数量決定のステップを示す。

表 2 - 3 生産数量決定のステップ表

ステップ1. 生産するアイテムの選定																	
対象エリア製品リスト																	
アイテムA	選定除外条件に該当しないアイテムリスト																
アイテムB																	
アイテムC																	
上振れした工場生産要求量を算出して、欠品日の早いアイテムを選択する。																	
上振れ工場生産要求量 (日別)																	
アイテム/日付	在庫	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
アイテムA 在庫量	100	4	30	28	30	12	94	34	16	24	30	92	50	40	16	24	
アイテムB 在庫量	85	38	46	24	22	22	30	14	22	4	44	36	6	20	6	32	
アイテムC 在庫量	80	28	30	10	30	14	24	28	26	8	18	18	22	4	6	14	
上振れなし工場生産要求量 (日別)																	
アイテム/日付	在庫	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
アイテムA 在庫量	100	2	20	44	20	8	64	22	10	16	20	62	34	26	10	16	
アイテムB 在庫量	85	20	26	10	12	22	18	8	12	2	24	20	2	12	4	18	
アイテムC 在庫量	80	22	24	8	22	10	10	22	20	4	14	14	16	2	6	10	
最小確保日数																	
最大許容日数																	
	最早欠品予定日	計画値欠品予定日															
アイテムA	5日	6日															
アイテムB	3日	6日															
アイテムC	4日	5日															
最早欠品予定日の最も早いアイテムBを生産アイテムとして選択する。																	
ステップ2. 3. 生産数量算出と生産ロット適用																	
最小確保日数	工場生産要求量						最大許容日数	工場生産要求量									
9日	45						14日	125									
生産ロット	30						最小確保日数は任意に9日と設定したもの										
ロットきざみ量	10						最大許容日数は下振れ工場生産要求量から算出して14日となったもの										
							生産ロットは任意に30と設定したもの										
							ロットきざみ量は任意に10と設定したもの										
算出生産数量 = 45		生産数量 = 30 + 10 × 2 = 50															
最大許容日数・工場生産要求量 > 生産数量 が成立するので、生産数量を50に決定する。																	
生産計画日のライン生産能力余力が50以上あるか確認する。																	

以上のステップにより、生産するアイテムと生産数量が決定したら、対象アイテムの工場生産要求量から生産数量の 50 を引き、ステップ1の生産するアイテムの選定から繰り返し、生産するアイテムと生産数量を決定していく。生産制約で1日の生産能力を超えたところで、対象エリアの生産計画日の生産アイテムと生産数量の計画作成を終了する。

(7) アラーム機能の設定

SCMで(1)から(6)に述べてきた生産計画作成のアルゴリズムを使用して生産計画を実施するに当たり、チェック機能が必要になる。そのチェック機能としてシステムにアラーム機能の設定をする。このアラームを確認し対応を実施することにより、生産計画または販売計画の修正をして欠品回避や不良在庫の抑制を行う。

設定すべき主なアラームは次のものである。

① 欠品発生アラーム

生産計画作成期間中（例 12 週間）に、生産が実施されても欠品が発生する場合に欠品発生アラームを発生させる。このアラームの発生原因としては、生産エリアの設備能力に対して需要が大きくなっている場合に発生し易くなる。特に(2.3節)で述べた需要分析による販売量管理マトリスクのS1主力品の需要が大きくなった場合、S2徳用品の販売量分散が大きくなった場合に、生産能力及び生産制約を超えた需要となり、このアラームが発生する。

② 出荷期限超過アラーム

生産計画作成のアルゴリズムでは、需要の下振れを考慮して生産日程と生産計画が決定されているが、最小設定日数が大きかった場合や実際の需要が大きく下振れした場合に、このアラームが発生する。特に(2.3節)で述べた需要分析による販売量管理マトリスクのS2徳用品の実際の需要が、販売量見込量より大きく下振れした場合、S4象限で実際の需要分散が小さかったために生産量が過剰であった場合に発生し易くなる。

③ 生産要求量対応不可アラーム

生産要求量対応不可アラームとは、生産計画作成時に生産要求量を満たす生産量を確保できない場合に発生する。発生原因としては、生産計画時のアイテム選択でエリア内の選択順が遅く、生産能力制約等で生産要求量分の生産量が出来ないということである。そしてこれは、(2.3節)需要分析で述べた(2-3)式が成立している時に特に発生する。

## 2. 5 サプライチェーン視点のスマートファクトリーランドデザイン

### 2. 5. 1 プロセスチーズのサプライチェーン

プロセスチーズのサプライチェーンは、大手乳業メーカーの事例によると、以下のようにになっている。

#### (1) 海外原料チーズ調達物流

海外サプライヤーから購入契約している原料チーズをブッキング（月ごとの船積み計画）し、海上輸送する。日本の揚地の港湾で保税輸送をして、指定の保税冷蔵

倉庫に入庫保管し品質検査を行う。品質検査に合格した原料チーズは製造業からの指示により、通関を切り国内貨物とし保管、工場冷蔵倉庫への輸送をする。この港湾業務は、製造業と契約している指定事業者により行なわれる。そして製造業は工場冷蔵倉庫で保管し、品質検査をして製造に使用する。

### **(2) 国内原料チーズ調達物流**

国内原料チーズは、北海道のナチュラルチーズ工場で生産されたものを、海外原料チーズと同様に港湾の冷蔵倉庫に輸送して保管する。その後の流れは、通関を切った後の国内貨物になった海外原料チーズと同様である。

### **(3) 製造工場**

製造工場では、前述のSCMの生産計画作成に基づいてライン別の製造計画を作成し、製造を行う。製造された製品は検査期間中工場冷蔵倉庫に保管され、検査合格品が出荷可能となる。

### **(4) 製品物流**

検査を合格した製品は、製造業管理の委託業者の保管冷蔵倉庫に輸送され、販売可能在庫として保管される。そして、日別の受注量を委託している運送業者が出荷配送する。

以上がスマート化の対象となるプロセスチーズのサプライチェーンの業務内容である。

## **2. 5. 2 新事業所のグランドデザイン基本方針**

サプライチェーン全体を効率化、スマート化するための新事業所建設のグランドデザインの基本方針は、以下のようにした。

### **(1) 原料チーズ調達物流の効率化**

港湾で行われている原料チーズ調達物流業務を製造工場と一体化したものとす。これにより、港湾と製造工場に分割していた原料チーズの保管機能を一つに集約できる。よって、通関を切る場所が、港湾から製造工場に変更になるため、工場の冷蔵倉庫に保税、通関機能を持たせる。また、工場の倉庫管理システム(WMS: Warehouse Management System)は通関に必要なシステム機能を有したものとする。

### **(2) 製造工場の効率化**

垂直型である既存のライン設計の方式に対して、設備能力の同期と需要に対する柔軟性を最適化できるようにするため、製造ラインを水平方向に共通化できる設計

思想とした。そして、第4章で提案している水平階層型システムを導入し、工場全体の管理と制御を効率化し、需要の柔軟性に対応できる生産計画の最適化を行う。また、トレーサビリティの確保、ミス防止、オペレーター教育の短縮化等、スマート化への対応が可能なシステムを構築する。

そのため、集約新工場は、新規技術、新規設備を導入して生産性の効率化、省設備化、省スペース化を実現できる設計とする。工程管理と自動制御システムを導入し、製造自動化と連続運転ができるようにして、省人化、工程での製品ロスを削減する。また、多品種少量生産の労働集約型のラインでは、システムと人の作業の融合を計り、生産性の効率化を実現する。

### **(3) 製品物流の効率化**

工場冷蔵倉庫と業者に委託している保管冷蔵倉庫の機能を一体化し、生産工場のシステムと倉庫のシステムを連動させ、オペレーションとマネジメントの効率化を行う。これにより、製品在庫管理、出荷管理が工場全体の管理システムで一元管理できる。

以上の新事業所の構想から、次のような施設建設を行うグランドデザインとした。

## **2. 5. 3 新工場・総合物流センターのグランドデザイン**

### **(1) 複数工場を集約した生産工場とする。**

集約新工場は、既存の複数工場を集約したものとし、重複機能の統合化、集約による要員の削減、資材調達の一元化によるコスト低減、エネルギーコストの低減、設備維持費用の低減をする。

また、生産機能が集約されるため、物流機能も集約し統合化をする。

### **(2) 生産工場に隣接した物流センターを建設する。**

この物流センターは、①原料チーズ保税保管、通関、国産原料チーズ保管機能と生産工場への自動供給機能、②生産工場から製品を自動入庫し保管、在庫管理、販売出荷機能、③他の工場で生産された製品の入庫機能と保管、在庫管理、販売出荷機能、以上3つの機能を有する総合物量センターとする。工場のシステムと物流センターのシステムを連動させると共に、SCM、通関システムとの連動も行い、通関指示、原料の生産工場への供給指示、製品出庫指示等をシステムで行えるようにして、原料チーズ購買の柔軟性を確保し、物流機能の合理化を行い、スマート化された物流センター運営を実現する。

### (3) システムの構築導入

製造制御システムと倉庫制御システムの上位に、MES（製造実行システム）とWMS（倉庫管理システム）を構築導入して、全社システムであるSCM、基幹系業務システムとの連動機能を確保し、データ活用の柔軟性、トレーサビリティの強化を実現する。また、製造と物流センターの計画機能をシステム統合で一体化し、製造物流連携の効率化と迅速性を実現する。

製造、物流のオペレーションはシステムで立案した計画により、的確な原料チーゾの供給、製造設備の運転管理、物流センター設備の運転管理、製造と物流センター共にオペレーター作業の最適化とミス防止を実現し効率化する。

また、製造と物流センターのマネジメント機能もシステムによる統合管理ができるようにする。以上を実現するために複数のデータベースシステムを構築し、各システムを統合管理する。このようなシステム構築と導入によりOT、MTとITを融合させ、工場、物流センターが連動したスマートオペレーションを実現する。

そして、ユーティリティ（電気・ボイラー・冷凍機・空調機等）の運転管理も製造と物流センターのシステムと連動させ、最適な運転制御と省エネルギー、省資源化を実現できるようにし、環境対応を強化する。

既存方式とスマート化のグラウンドデザインの比較図を図2-7に示す。

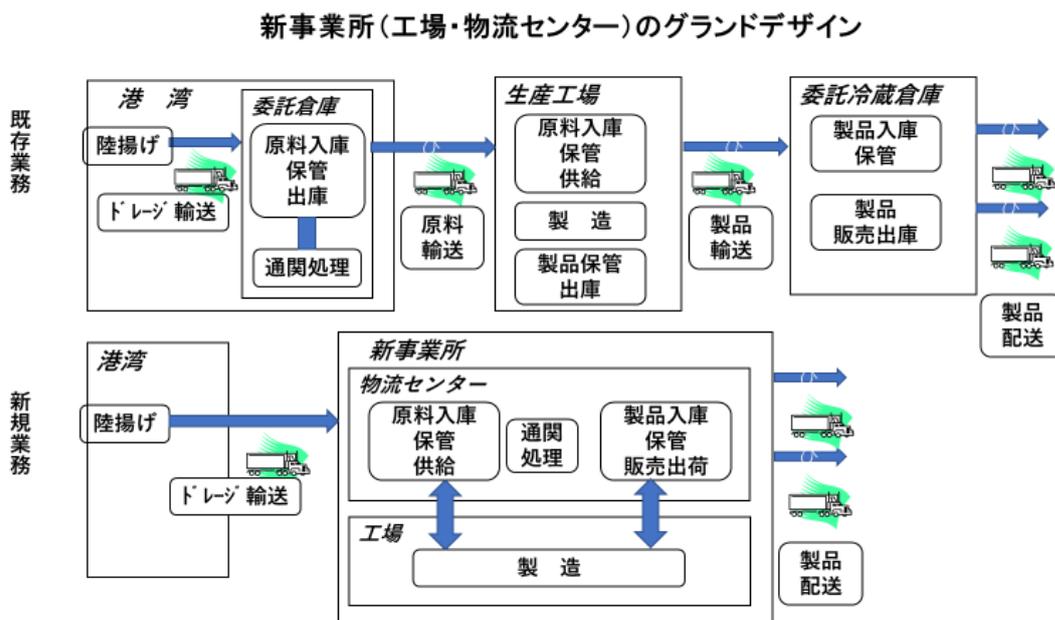


図2-7 サプライチェーンスマート化のグラウンドデザイン

図2-7で解るように、サプライチェーンの原料調達物流、製品物流の中で、原料輸送、製品輸送が廃止される。また、原料チーズと製品の保管倉庫が分散していたものを生産工場と一体化させ、業務合理化と効率化を実現している。

## 2. 5. 4 新事業所（新工場・総合物流センター）の概要

### （1）製造工場

所在地 茨城県稲敷郡阿見町

敷地面積 134.169 m<sup>2</sup>

創業開始日 2014年3月

許可事項 食品営業、J A S 認定、I S O 14001、F S S C 22000

職員数 約 500 名

- ・ 生産ライン

プロセスチーズ類、マーガリン類合計で 39 ラインを持つ。

- ・ 生産量実績

プロセスチーズ類 約 28,000 t（2017年実績）

マーガリン類 約 18,000 t（2017年実績）

生産アイテム数 約 200 アイテム

- ・ 使用原料

輸入チーズ 豪州、ニュージーランド、アメリカ他

国産チーズ 雪印メグミルク なかしべつ工場、大樹工場

原料油脂 食用植物油脂（大豆、コーン、菜種等）

食用精製加工油脂

- ・ 生産工場の特徴

プロセスチーズ類、マーガリン類を生産する最新技術と自動化設備を導入し、M E S（Manufacturing Execution System：製造実行システム）とD C S（distributed control system：分散制御システム）を実装した、高度なS C Mが運用可能な高効率製造工場である。

### （2）総合物流センター

創業開始日 2013年12月

許可事項 倉庫業登録、保税蔵置場、食品営業、I S O 14001、

職員数 約 85 名（協力会社を含む）

- ・ 設備概要

建設物高さ 31m

冷蔵能力 約 84,000 t

保管温度帯	-25℃、0℃、5℃、10℃、20℃、常温（6温度帯）
自動立体倉庫	31,244 棚
スタックークレーン	8 基（自動立体倉庫内）能力 240m, 125m/分
パレタイザー	11 基（製品入庫用）能力 6,500 ケース/時
デパレタイザー	3 基（原料チーズ供給用）能力 900 ケース/時
パレットチェンジャー	4 台 能力 160 パレット/時
周回台車	15 台 能力 100 パレット/時
バース数	20 バース

- ・ 配送及び転送地域

北海道、東北、関東、中部、関西、九州の全国地域

- ・

- ・ 総合物流センターの特徴

製品保管機能と他場所からの入庫機能を含めた物流配送機能を併設している。また、原料チーズの保管と輸入品の保税蔵置機能を装備しており、通関倉庫に適応している。生産工場とは隣接しており、双方のシステム連動により、原料チーズの生産工場への自動供給と製造された製品の自動入庫機能を有している。以上の特徴を持つ国内では初の複合型冷蔵物流センターである。

## 2. 5. 5 スマート化による効果

### （1）サプライチェーン効率化

サプライチェーン効率化は、図 2-7 から解るように以下のコスト項目が削減できる。

#### ①港湾委託冷蔵倉庫費用

- ・ 原料チーズ入出庫費用
- ・ 原料チーズ保管費用
- ・ 輸入チーズ通関作業費用

#### ②委託製品保管冷蔵倉庫費用

- ・ 製品入出庫費用
- ・ 製品保管費用

#### ③輸送費用

- ・ 港湾冷蔵倉庫→製造工場への原料チーズ輸送費用
- ・ 製造工場→委託製品冷蔵倉庫への製品輸送費用

#### ④工場冷蔵倉庫作業費用

- ・ 既存の複数工場の冷蔵倉庫庫内作業費用

以下の項目については、費用が増加する。

⑤原料チーズドレージ費用

- ・ 港湾内ドレージから、陸揚げから物流センターまでのドレージになる増分費用

⑥製品輸配送費用

- ・ 新物流センターから全国へ輸配送する増分費用

⑦新物流センター庫内作業費用

- ・ 原料チーズ通関作業費用
- ・ 製品ピッキング出荷作業費用

⑧エネルギー費用

- ・ 新物流センター電力費用と既存複数工場の冷蔵倉庫電力費用の差分

以上のサプライチェーン効率化による費用効果を表 2 - 5 に示す。この表の投資額比率は、メリット額を投資額で割ったものである。また、費用構成比は各項目のメリット額を総メリット額で割ったものである。

表 2 - 5 サプライチェーン効率化のコスト効果

メリット項目			投資額比率 %	費用構成比 %
輸配送	広域輸送	物流ネットワーク変更による変動	0.4	3.0
	地場配送	在庫拠点変更による変動	-1.5	-11.4
	ドレージ	距離延長による変動	-0.8	-6.5
	輸配送計		-1.9	-14.9
保管・荷役	保管料金	原料チーズ保管料金		
		製品保管料金		
		電力費用削減	11.9	92.8
	入出庫作業	原料チーズ入出庫費用削減		
		製品入出庫費用削減		
		既存工場作業費用削減		
		新物流センター作業費用		
		新物流センター電力費用	2.8	22.1
	保管荷役計		14.7	114.9
	合計		12.8	100.0

(2) 生産効率化

生産工場集約と総合物流センターの隣接による生産効率化は以下のものがある。

① 固定労務費削減

- ・ 複数工場要員合計に対して、約 60%程度の要員数で運営可能となる。

② 生産性の向上

- ・ 製造ライン能力増強による変動労務費の削減。

- ・ 新技術、新設備、システム導入による歩留まり向上と工程ロスの削減。
- ・ 製品、仕掛品廃棄費用の削減。
- ③ 設備維持保守費用削減
  - ・ 製造工場集約による、設備維持保守の一元化による費用削減。
  - ・ 新規導入設備の維持費用の既存設備に対する費用低減。
- ④ 固定経費削減
  - ・ 製造工場集約による、総務費用、厚生費、修繕費等の削減。
  - ・ システム導入による間接業務の費用削減。
- ⑤ ユーティリティ費用
  - ・ 製造工場集約により、ユーティリティ設備が統合化されるための費用削減。
- ⑥ 資材原材料費削減
  - ・ 製造工場集約により、資材原材料物流が一元化されることによる費用削減。
  - ・ 廃棄資材原材料の削減による費用削減。

生産効率化と隣接した総物流センターの統合化により、上記項目の効率化による費用削減ができる。

### (3) 情報とシステム共有化

図2-7で解るように、既存ではサプライチェーン上の業務が分散された事業者によって遂行されていた。そのため、サプライチェーンの分散した業種で独自のシステムを保有し、複数システムにより業務を遂行しており、各システムに重複機能と重複データを持っていた。それらをサプライチェーンの中で情報連携させていくには、情報処理のプロセスに無駄を発生させトータルでのコンピュータ資源を増大させてしまう。そこには、大きな情報非効率化が発生することになる。

このランドデザインでは、原料チーズ調達から製品配送までを生産工場に集約したため、システムも製造業に集約される。そのため、データベースの一元管理による情報の共有化、情報伝達の大幅な効率化が達成できる。

効率化できる情報管理は、取引情報、在庫情報、販売情報等多数あり、需要変動の柔軟性に対応する機能と生産計画作成の精度向上により、生産工場の設備能力を同期化させることにより生産量の最適化が達成できる。

## 2. 6 事例分析のまとめ

以上、事例分析では、スマートファクトリー構築の基軸となるSCMの中で、特に関連性が強い需要分析と生産計画について述べてきた。

そして、サプライチェーン全体の中でのスマートファクトリーはどうあるべきかという問題に対して、よりサプライチェーンを高度で効率化するためのグランドデザインを提示した。

需要分析と分析されたアイテム群に対応した生産計画をモデル化し、実務の中で業務モデルとルールを設定し、システムによる定型化をすることによりスマートファクトリー構築に対して次のような対応を取ることができる。

季節変動の大きいアイテム群、突発的な需要が発生するアイテム群等特殊なアイテム群の対応を含めた、適切な工場の製造ライン設計と製造ラインの効率的な稼働運用を実施できる。

これらは、第3章で述べるスマートファクトリーに向けた製造ライン設計モデルの提案を適切に実施するために重要なファクターである。というのは、この提案モデルでは設備間の同期と需要変動に対する柔軟性を同時に考慮し、設備の投資決定と設定期間における稼働決定を最適化するモデルとして提案しており、本章で述べた需要分析による需要パターン、需要量と需要量分散によるアイテム分類、販売計画量と実際需要量との乖離によるアイテム分類を分析することにより、モデル式のパラメータ設定、ひとつのモデル式に適用するアイテムのグルーピングによる分類が可能になる。よって、精度の良い決定変数を得ることに貢献できる。

また、工場のシステム構築は、スマートファクトリーに対応するシステムとしての柔軟性を持ち、生産されるアイテム群の需要特性に適合するものとして設計できる。このことは、工場建設やライン増設時に、需要分析により製品の需要特性を把握し、生産計画のシミュレーションをすることにより、第3章で提案しているモデルによる設備能力、設備台数等の妥当性の検証をすることを可能にする。

工場運用においては、SCMと工場全体のシステムとの連携により、工場のシステム機能を効率的に活用し、システムによるプランニング、工場マネジメントが適切にできる。そして、製造ノウハウの蓄積、トレーサビリティの確保が容易に達成でき、第4章で提案している水平階層型システムモデルによるシステム開発の効率化と、システム運用による設備運転自動化、人の作業管理の適正化による、工場運営の効率化を実現できる。

スマート化のグランドデザインは、サプライチェーンを適切に分析して効率化し、最適な運用ができることを前提に設計しないと、サプライチェーンの各機能の設計と運用及びスマート化の中心となる製造工場の設計と運用が、グランドデザインで意図したことが達成できないものになってしまう。

以上の観点から、スマートファクトリー構築に貢献する設計モデルとして、第3章では生産工場設計の基本となる連続した2工程の製造ライン設計モデル、第4章で工場全体を管理、運用するための水平階層型システム構成モデルを提案する。

## 第 3 章 プロセスチーズ工場における連続した 2 工程間

### ライン設計問題に関する研究

#### 3. 1 はじめに

本節では、本章で提案するライン設計モデル提案の背景とモデルの概略、そしてモデルの対象としているプロセスチーズ製造とその特徴を述べる<sup>2</sup>。

##### 3. 1. 1 本章の概略

インダストリー4.0 に代表される第 4 次産業革命ではスマート工場が主役となっており、多くの研究論文が発表されている。しかしながら、その多くは自動化、知能化、I o T (Internet of Thing)、A I (Artificial Intelligence)に関するものであり、運用における同期化や柔軟性を考慮した設計に関する研究は見られない。本章では、プロセスチーズ工場における乳化工程と充填工程を対象とし、設備投資費用、稼働費用、同期化費用、及び柔軟性費用を考慮した設計問題を考える。スマートファクトリーは必要なものを、必要な時に、必要な量だけ、効率よく製造することが必要条件であり、需要の変動など外部環境の変化や内部環境の変化に柔軟に対処できるように設計する必要がある。そのため、工場を設計するときに運用、同期化、柔軟性を考慮することがスマート化に貢献できると考えた。本章では、スマート化に対応するためのライン設計事例をレビューし、提案モデルとして投資決定変数と運用決定変数を用いて連続した 2 工程間のライン（乳化工程と充填工程）設計問題に対してモデル化を行う。

モデル化の内容は、実際稼働しているプロセスチーズの生産ラインをベースに、実際に投資判断をする時に総需要（年間等）だけに対する投資決定をして、需要期間を分割して運用した時に、設備能力差によるミックスロスや生産ロットが大きいための過剰在庫を起こさないように、稼働費用、工程間の同期化、需要の変動への

---

<sup>2</sup> 本章の一部は、日本経営工学会論文誌に掲載決定している。

松本卓夫, 久保寺静, 志田敬介, 松川弘明: “プロセスチーズ工場における 2 工程間ライン設計問題に関する研究”, 日本経営工学会論文誌

柔軟な対応を考慮した生産ラインの設計問題を考える。乳化工程と充填工程には複数の設備を設置することができるとし、設備能力と台数の組み合わせを最適化することを目的とする。投資と運用を同時に考える場合、目的関数が非線形になる。そして、組み合わせ数が膨大になり、組み合わせ爆発が起きるので、問題の特徴を用いて階層化し、効率的に最適解を求めるアルゴリズムを提案した。また、提案モデルは数値実験を通じてその妥当性を評価し、さらに事例研究を通じて既存工場の運営を評価すると同時に、非合理的な投資を合理的にするための分析を行った。

### 3. 1. 2 プロセスチーズの製造工程

#### (1) プロセスチーズ製造工程の全体の流れ

プロセスチーズの製造工程は、量産ラインと多品種少量ラインが混在していることが多いため、連続プロセス製造とバッチプロセス製造の組合せ形態は多岐に渡る。更に製品ごとに製造日付管理が必要なため、生産計画と製造管理は複雑である。プロセスチーズは原料ナチュラルチーズの供給配合、粉碎、乳化、充填などの工程を経て製品となる。供給工程では自動倉庫から低温状態の原料ナチュラルチーズをベルトコンベヤで粉碎工程まで搬送する。粉碎工程では搬送された原料ナチュラルチーズのブロック(20kg前後)を砕いて溶けやすい小さい粒にして乳化工程の設備容量に合わせてバッチ配合を作る。乳化工程では、バッチ配合された原料ナチュラルチーズを乳化装置に投入して液状チーズにする。液状チーズはさらに成分調合などの処理を経てプロセスチーズとなり、一定形状のパッケージに充填・冷却・包装して製品となる。

プロセスチーズの製造工程と製造設備は以下のようにになっている。

#### ● プロセスチーズの製造工程

①原材料搬送 → ②原材料処理(配合) → ③計量調合 → ④混合(調合混合、添加物混合、混練) → ⑤乳化 → ⑥加工M I X保持(タンク保持) → ⑦M I X検査 → ⑧充填 → ⑨硬化 → ⑩包装 → ⑪製品搬送 → ⑫倉庫保管 → ⑬品質検査

尚、製造終了後、及びM I Xの品種切替時には、自動洗浄C I P(Cleaning In Place)と手洗浄を実施する。①～⑦を前工程と呼び、この前工程において①～③を原料供給配合、④～⑦をM I X製造としている。⑧～⑬を後工程と呼ぶ。前工程と後工程の詳細と設備構成は以下のとおりである。

#### (2) 前工程

プロセスチーズ製造の前工程は、原材料搬送から、M I X製造までの工程である。前工程は連続プロセス製造又はバッチプロセス製造及び計量調合等の人手作業の

組合せで構成されている。連続プロセス製造では、一定時間（例えば、12時間）各加工設備を連続運転させて製造する。そしてバッチプロセス製造では、各加工設備の製造能力に基づくバッチ単位で繰り返し製造をする。複数の品種を同一のプロセスで製造する場合製造品種切替によるロス、製造工程において設備が分割されているため、バッチプロセス製造の方が連続プロセス製造に比べて少ない。

また、前工程では、M I X製造工程で物性変化を伴うため、製品品質（粘稠度、水分率、M I X成分値等）は、各工程における物性コントロールの影響を強く受ける。そして、この前工程の乳化工程でナチュラルチーズからプロセスチーズに変化する。前工程の代表的な設備構成は以下の通りである。

#### ① 製造設備

##### ① 原料供給配合設備

- ・ 原料チーズ搬送コンベア（ブロックチーズ等を個別搬送するコンベア）
- ・ ダンボール開壘、フィルム剥離機
- ・ 粉碎機（ブロックチーズを細かく粉碎する設備）
- ・ 配合チーズ搬送設備（粉碎、配合されたチーズの搬送する設備）

##### ② M I X 製造設備

- ・ ミキサー（粉碎された複数の原料チーズを混合する設備）
- ・ 乳化機（ミキサーで混合された原料チーズを加熱溶解攪拌して乳化する設備）
- ・ M I X送液配管（溶解混合されたM I Xを送液するパイプ配管）
- ・ 送液バルブ（M I Xを乳化設備や充填機に送液する際に分岐させるためのバルブ）
- ・ 保持タンク（乳化されたM I Xを充填機に送液するために攪拌保持しておくためのタンク）

##### ② 計測設備（センシング）

- ・ 流量計、温度センサー、圧力センサー、水分センサー等（各状態値をリアルタイムに計測してプロセス制御にフィードバックする。また、状態実績値として記録する）

##### ③ ユーティリティ供給設備

- ・ 熱供給配管、エアー配管、電気配線（各設備を稼働させるためのエネルギー供給設備）

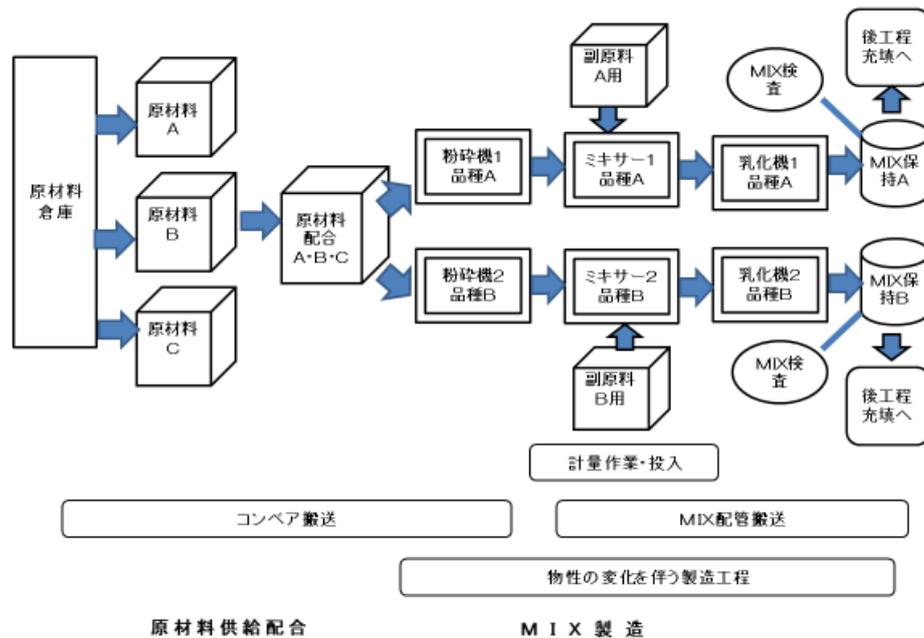


図 3 - 1 プロセスチーズ製造の前工程

### (3) 後工程

プロセスチーズの後工程は、充填から品質検査までの工程である、コンベアで連結された設備が配置され、製品形状になる充填工程からはディスクリート型の固体搬送となる。まず充填工程では、液状MIXを個別包装し、完成品形状にした後、製品パッケージに入れる。次に硬化工程では、この製品パッケージを急速冷却し、設定された製品温度まで下げることで液状から硬化させる。つまりこれは、熱交換速度の差による物性コントロールを実施する工程である。次の包装工程では、製品パッケージをダンボール等のケースに梱包する。このケース単位で製品トレーサビリティを実施することが多い。この後、コンベアでダンボールを製品倉庫へ搬送し、倉庫に保管、包装検査や量目検査、異物検査、印字検査等を実施する。

多品種生産にあたり、同一のMIXから異なる形状の製品を製造する場合は、複数種類の充填機へMIXを振分ける。一方、異なるMIXから同一形状の製品を製造する場合は、各MIXを同一種類の複数台充填機へ流下させる。充填工程までは、前工程のプロセス制御と連動し、機械制御していることが多いが、充填工程以降は、各設備単体で機械制御していることが多い。また、包材資材の供給は機械制御とは独立しており、自動化されている場合と人手作業の場合がある。

後工程の代表的な設備構成は以下の通りである。

#### ① 製造設備

- ・ 充填設備 (MIXをパッケージに充填する設備)

- ・ カートナー（ポリ、アルミ等の包材に充填された製品をカートンに入れる設備）
- ・ ケーサー（カートンに入った製品、またはポリ包装の製品をダンボールケースに梱包する設備）
- ・ 急速冷却設備（一定の時間で製品を目標温度まで冷却する設備）
- ・ 搬送コンベア（製品、ダンボールケースを搬送する設備）
- ・ 印字設備（日付等を印刷する設備）

② 検査設備

- ・ ウェイトチェッカー（重量を測定する設備）
- ・ 画像判定設備（印字不良、パッケージ間違い、汚れ、フタ等のずれを検知する設備）
- ・ X線判定設備（製品中の異物を検知する設備）
- ・ リークテスター（包装内からの空気の漏れを検査する設備）

③ ユーティリティ供給設備

- ・ 熱供給配管、エアー配管、電気配線（各設備を稼働させるためのエネルギー供給設備）

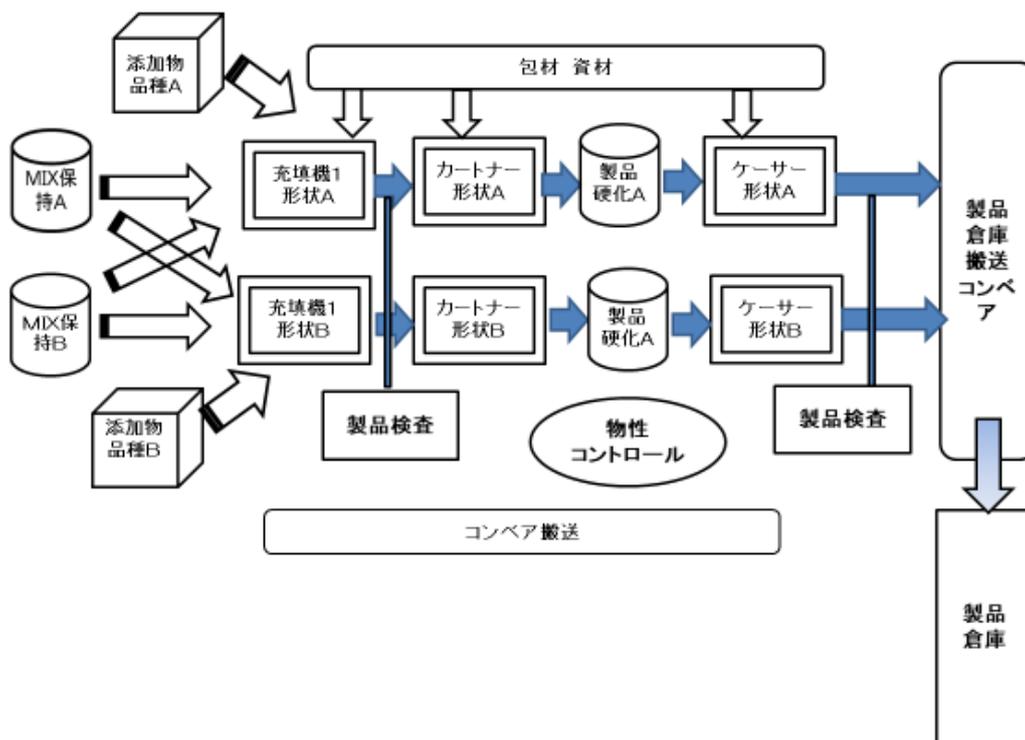


図 3 - 2 プロセスチーズ製造の後工程

#### (4) プロセスチーズ製造工程の特徴

プロセスチーズの生産における重要な工程は乳化工程と充填工程である。例えば、乳化工程では液状化された原料ナチュラルチーズの変質を防ぐために、一定時間内（90分程度）に充填工程に押し出す使用時間制約がある。従って、乳化工程の生産能力（設備能力の合計）が大きすぎると使用時間制約により廃棄が発生する可能性が高くなる。一方、乳化工程の生産の能力が小さすぎると常に稼働しても生産が追い付かず、充填工程における設備の稼働率が低下してしまう問題がある。そのために、プロセスチーズ生産ラインの設計では一般的に、まずは充填工程の生産能力を設計し、その後乳化工程の生産能力が充填工程の能力を若干上回るように設計している。運用においては乳化工程の生産能力を充填工程の設備稼働率に合わせて調整するが、本章の研究では乳化工程と充填工程の生産能力の差を小さくすることを同期化と呼ぶことにする。

ここで、同期化をよくするためには生産ラインを設計するときに性質の異なる設備である乳化設備と充填設備の組み合わせを適切に選定する必要がある。例えば、毎日需要が変化せず、8トン/日であるとすれば、8トン/日生産できる充填設備と乳化設備を1台ずつラインに導入すればよい。しかし、需要が最大8トン/日、最小2トン/日であるならば、設備能力が6トン/日と2トン/日の設備を1台ずつ導入した方がより経済的かも知れない。生産ラインの設計で先に決めるべきことは、設備の台数と各設備の設備能力である。これが決まると、その組み合わせによって毎日の生産能力が決まるので、需要量と生産能力のギャップが小さいほど良い設計になる。

また、本研究では充填工程と需要量のギャップを柔軟性とし、投資意思決定の評価項目とする。

スマートファクトリーとは需要の変動に対して効率的な運用ができる工場であり、設計時から工場全体がスマートに運用できるようにすることが重要である。設計時に大きな能力を持つ充填設備を1台だけ導入してから、運用時にAIを入れてスマート化しようとしても限界があることは言うまでもない。

プロセスチーズの生産形態は、乳化工程の前はディスクリート型（機械部品加工など）生産方式、乳化工程から充填工程まではプロセス型（石油精製など）生産方式、そして充填工程の後半部分からは再びディスクリート型生産方式となっている。このように、プロセスチーズの生産はプロセス型とディスクリート型の統合型であり、生産ラインの設計では工程間の同期化を考慮する必要がある。

実際のプロセスチーズ生産ラインの設計はもう少し複雑であるが、乳化工程と充填工程が2つの重要な工程であることは変わりがない。図3-3に大手乳業の大規模プロセスチーズ生産ラインの全体概略を示す。

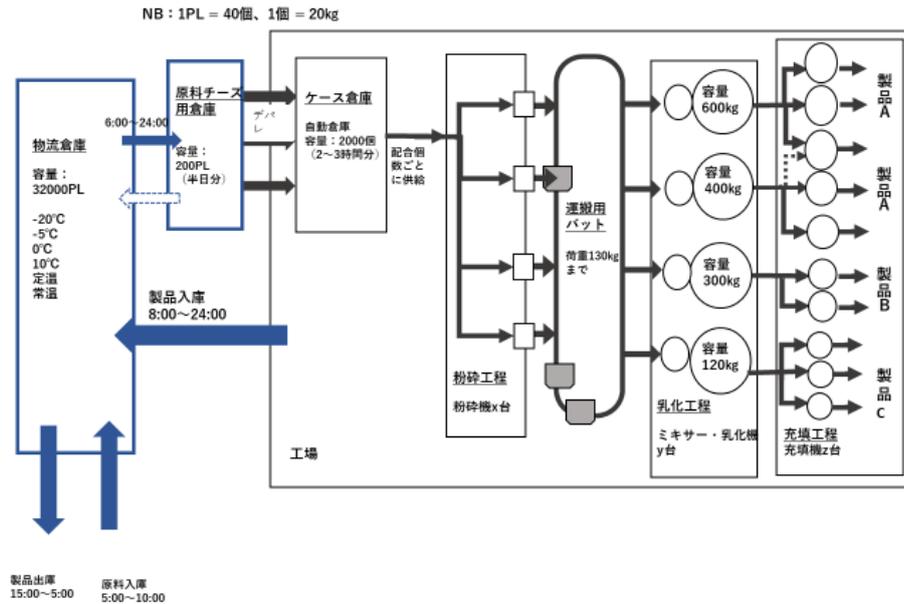


図3-3 プロセスチーズ製造ラインの略図

図3-3から分かるように、乳化工程にも充填工程にもそれぞれ4つの設備を導入できるようなライン設計になっている。しかし、いま現在の設備構成が最適であるかは不明である。乳化工程は3設備とし、充填工程を4設備にする案がより経済的かも知れない。そこで、本研究は最大設備数を4として、設備の購入を決める投資決定変数と、設備の稼働を決める稼働決定変数を導入して最適化モデルを構築し、数値実験と事例研究を通じて提案モデルの有効性を示す。

以下、第2節では既存研究を述べ、第3節では提案モデル、第4節では解法と数値実験、第5節では事例研究、そして第6節では本研究の結論と将来の展望を述べる。

### 3. 2 既存研究

インダストリー4.0の概念である管理シェル[102]は生産資源に外部とのコミュニケーションを可能にする標準化情報端末を取り付けた設備である。しかし、この概念は具体像がまだ描かれていない。管理シェルにより、標準化された情報端末をキャップとして設備等の資源にかぶせて設備間の交信を自動化できるとしても、異なる製品の製造プロセスや加工条件は異なるので、新しいラインに組込んでもすぐに良品を製造してくれるとは限らない。製品のモジュール化と類似しているが、設備のモジュール化を実現することは簡単ではない。なぜならば設備は、異なる生産

ラインに組み込まれると異なる機能を果たさなければならないことが多いからである。

以上のように、スマート化の具現化に向けた、最適な工程設計問題とシステム構成及び工場運営の最適化については不明な点が多い。そのために、工程設計最適化や設備運用最適化による工場運営の効率化が議論されるべきである。

日本では将来のスマート工場構築を具現化するための工程設計や設備運用についての実証実験が行われ、2017年には10社が経済産業省の実証実験を行っている[103]。その中でも、駿河精機の Suruga Gateway は生産システム設計において運用効率を高めるだけでなく、リードタイム短縮、不良品の削減、教育時間短縮を含めて、工場全体の効率を向上させることに成功している[104]。

90年代に注目を浴びた生産効率化の概念としてC I M(Computer Integrated Manufacturing)[105]がある。C I Mでは主に工作機械の自動化とグループ化が行われ、F M S (Flexible Manufacturing System) が中核概念であると言える。F M Sでは大きな設備投資が必要となるため、投資効果を得るためには工程最適化のための綿密な工程設計や工程運用最適化を達成できる運用設計が必要とされる。そのために、製品設計ではP D M S (Product Data Management System)、製品加工では自動化生産設備が活躍している。

工程設計最適化や工程運用最適化の先端研究は、学術誌では、I E E E、I J P E (International Journal of Production Economics)、I J P R (International Journal of Production Research)に掲載されている研究論文が代表的であると言えるが、そのほとんどは設備同士の協調を支援するクラウド化のアイデア(I o T)や、A Iの活用に関連する研究であり[106][107][108]、生産工程のバランスや能力の設計、運用の同期化や柔軟性を考慮した生産ラインの設計に関する研究は著者らが調べた限り見つからなかった。

他にもコンサルティング会社のレポートや各種固有技術関連の雑誌やマネジメント関連の雑誌の論文を調べても、スマート工場を明確に述べる論文はなく、ほとんどがスマート化を志向する情報化に関する研究と自動化に関する固有技術の論文であった。これらの研究のキーワードをまとめると、ビッグデータ、C P S、Cloud Computing、M 2 M Communication、Robot(Advanced、Autonomous)、Cyber Security、A P P (Application Program)、Work Automation、P L M(Product Lifecycle Management)、Horizontal and Vertical System Integrationに分類することができる。

一方、プロセス産業における需要の不確実性を考慮した貯蔵タンクの容量を決める研究は行われている[109]。この研究は在庫管理をベースとした研究であり、待ち行列理論を用いて貯蔵タンクの最適容量を決めている。しかし、各工程は完全に同

期化されていることを前提としており、需要の変化に応じて設備の稼働台数を柔軟に変化させることについては考慮されていない。

投資意思決定については従来から経済性工学において多くの研究が行われている。例えば、Discounted Cash Flow 法を用いた投資案の評価に関する研究[110]、需要の不確実性に対してモンテカルロシミュレーションを用いた投資案を評価する研究[111]、将来発生可能な事象をシナリオとするリアルオプションの技法による投資案評価に関する研究[112]、販売価格、販売量、市場寿命の不確実性も考慮した製造投資案の安全性分析に関する研究などがある[113]。これらの研究では設備投資について長期的な視点での意思決定を論じており、生産ラインにおける工程間の同期化、需要の変動に対して設備の稼働を柔軟に変更するなど、設備の運用方法を考慮して生産設備の能力と台数を決定する研究ではない。

本研究では生産設備の台数と設備の能力を決める変数を投資決定変数としているが、2つの工程の投資問題を独立に解く場合と連携して解く場合とで解は異なり、生産ラインの同期化レベルと外部需要に対応する柔軟性も考慮すると最適解はさらに変化する。従って、生産ライン設計においては外部の需要の変化に柔軟に対応でき、2つの工程の能力も同期化できるように設備の数と能力を決定することが必要になっている。

需要変動に対する生産対応の研究として、Push + Pull のハイブリット型生産システムに関する研究があるが、これは1製造ラインにおける設備のバッファリングに関する研究であり複数製造ラインのコンビネーションには対応していない[114]。また、需要変動に対応して自律的に稼働台数を変動させるアダプティブ生産システム(Adaptive Production System)に関する研究があるが、設備台数をどのように設定するかについては根拠が示されていない[115]。生産の平準化に関する研究もあるが、仕掛在庫量の削減及び工程バッファサイズの設定を論じた研究である[116]。

また、工場運用の効率化のために、生産現場(物理的空間:Physical space)のオペレーションと物流情報をRFIDや各種センサーを用いて自動的にコンピュータシステム(サイバー空間: Cyber Space)に吸い上げ、両者の同期化を通じて迅速且つ的確な意思決定を行い、オペレーションの効率を上げることが提唱されている。実際、今現在多くの中堅以上の製造企業では情報化が急速に進んでいる。しかし、運用設計が工程情報化に対して最適ではないと、工程での運用において作業負荷が増加してしまうことになる[118]。

### 3. 3 提案モデル

本章の研究では国内大手乳業の主管工場のスマート化を対象に、プロセスチーズ製造ラインにおける乳化工程と充填工程の設備の台数と能力の組み合わせ選択問題を考える。

目的関数は、設備の投資費用、設備の稼働費用、同期化費用、及び柔軟性費用の合計とする。また、設備の投資費用は設備の購入費用に正比例するとし、投資期間は与えられているものとする。設備の稼働費用を考慮するのは、需要が変動するためである。需要が変動する場合には設備の稼働台数を少なくすることで運用費用を節約することができる。乳化工程と充填工程では性質の異なる設備を使用しており、同期化費用は乳化工程で稼働している設備の能力と、充填工程で稼働している設備の能力に差が大きくなることを防ぐためのペナルティ費用である。柔軟性費用は、充填工程の総生産能力と総需要との差が大きくなることを防ぐためのペナルティ費用である。

ペナルティ費用を算出するための同期化係数 $\alpha$ と柔軟性係数 $\beta$ は任意に設定する係数であるが、一般化するのは難しい。そこで、経験値に基づいて工程の特性を十分に考慮して設定値を決める必要がある。今回の乳化、充填工程の事例では、以下のような指針に基づいて設定値を決定する必要がある。

- 同期化係数 $\alpha$ の設定指針：投資費用、人件費、時間制約、ロットサイズ、ランニングで発生するミックスロス費用を考慮して係数を決定する必要がある。
- 柔軟性費用 $\beta$ の設定指針：投資費用、人件費、過剰生産の製品ロス費用を考慮して係数を決定する

以上のように、設備費用だけを考慮するのではなく、運用費用も考慮し、さらに在庫の山を作らないことも考慮して、生産ラインを設計するとき、異なる能力を持つ設備の組み合わせからより柔軟に外部の需要変化に対応できる案を選ぶことができるようにした。

また、製品の需要は営業部門が全国各地の顧客（卸業等）からの受注と過去の販売量と期ごとのパターン（需要予測と販売計画）に基づいて加工し、SCMなど情報システム経由で生産部門に生産指示を出す。従って、生産ラインにおける需要は実質的に平準化された後の生産指示量であり、出荷先からの受注ではない。本研究では需要は不確実であるが毎年のパターンはほぼ同じであり、各期の需要は与えられるものとしてモデル構築を行う。

## 最適化問題 P

objective

$$\begin{aligned} \min. \quad & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} A_{ij} x_{ijk} + \sum_{t \in H} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} O_{ij} x_{ijk} y_{ikt} \\ & + \sum_{t \in H} \alpha \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (CP_{1j} x_{1jk} y_{1kt} - CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt}) \\ & + \sum_{t \in H} \beta \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt} - d_t) \end{aligned} \quad (3-1)$$

subject to

$$\sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, i \in I, k \in K \quad (3-2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CP_{1j} x_{1jk} y_{1kt} \geq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt}, t \in H \quad (3-3)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt} \geq d_t, t \in H \quad (3-4)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J, k \in K \quad (3-5)$$

$$y_{ikt} \in \{0,1\}, i \in I, k \in K, t \in H \quad (3-6)$$

### ・変数の説明

上記モデル式に使用している各変数は以下の通りである。

$A_{ij}$  : 工程  $i$  に設置できる  $j$  タイプ設備の投資費用 (円/全期間)

$x_{ijk}$  : 投資決定変数 ( $i$  工程  $j$  タイプの設備を  $k$  ラインに設置するとき  
 $x_{ijk} = 1$ )

$O_{ij}$  : 工程  $i$  に設置できる  $j$  タイプ設備を稼働するときの固定費用 (円/期)

$y_{ikt}$  : 稼働決定変数 ( $i$  工程  $k$  ラインを  $t$  期に稼働するとき  $y_{ikt} = 1$ )

$\alpha$  : 同期化ペナルティ係数

$CP_{ij}$  : 工程  $i$  に設置できる  $j$  タイプの生産能力 (kg/期)

$\beta$  : 柔軟性ペナルティ係数

$d_t$  :  $t$  期の需要を表す。

### ・インデックス集合の定義

$I$  : 工程の数

$J$  : 工程の設備タイプ数

$K$  : 工程のライン数

$H$  : 需要期の数

インデックス  $J$  については、同一製品群の工程 1 と工程 2 の市販設備の種類は最大 5 タイプ程度であるため、両工程とも最大値を 5 にし同じであるとした。選択対象外の設備種類がある場合には購入価格を大きい値に設定し、その設備が選ばれないように工夫した。このことによりモデルの記述もアルゴリズムの記述も簡単になる。インデックス  $K$  についても同様の考えに基づいて、両工程とも最大値を 4 に設定した。

#### ・モデル式の説明

##### ・式 (3-1)

本式は目的関数であり、第 1 項は投資費用、第 2 項は稼働費用、第 3 項は同期化費用、第 4 項は柔軟性費用をそれぞれ表す。第 2 項から第 4 項までに投資決定変数と稼働決定変数の掛け算が含まれており、設備が設置されなければ運用もできないことを意味する。

##### ・式 (3-2)

本式は設備割り当ての制約であり、 $i$  工程  $k$  ラインには多くて 1 台の設備しか配置しないことを意味する。

##### ・式 (3-3)

本式は期ごとの工程間の生産能力制約であり、充填設備能力を最大に発揮するために、乳化設備の能力を大きめに設定することを意味する。この理由は経験知と言われているが、連続・流れ生産を行っている充填設備の故障率が高いこと、また、乳化設備はバッチ処理を行っているので、運用上バッチ処理の間隔を調整するだけで 2 つの工程の生産能力を一致させることができるためである。

##### ・式 (3-4)

本式は期ごとの生産能力が需要より大きいことを意味する。この制約により投資決定変数は最大需要に合わせて選ばれ、運用においても各期の需要に合わせて稼働設備の最適な組み合わせが選ばれる。

本モデル式は、制約条件をさらに入れることで整数計画問題として定式化することができ、最適化パッケージの適用範囲を拡大できる。よって、工程数や期間数が多い場合にも問題を解くことが容易になり、本論文のアプローチを他事例にも適用できるようになる。ただしその場合、運用決定変数  $y_{ikt}$  のインデックスを増やして、 $y_{ijkt}$  にする必要があるので、新たなインデックスを考慮した解法アルゴリズムの開発が必要になる。

### 3. 4 解法と数値実験

#### 3. 4. 1 解法

計算時間短縮のためにプロセスチーズの生産ラインの乳化設備と充填設備の特徴を考慮した解法を提案する。充填工程の生産能力が最大需要を満たさなければならないこと、また乳化工程の生産能力が充填工程の生産能力より大きいことが重要なポイントになる。これに基づいて投資決定変数 $X_{ijk}$ の組み合わせを減らすことができる。

本研究ではまず設備投資について、充填ラインの生産能力を期単位の最大需要だけに基づいて、制約条件(2)~(4)を満たす設備投資の組み合わせ集合(設備投資実行可能解集合)を生成し、次に各設備投資案における最適運用モデルの期の設定をするが、この問題は膨大な数の0-1変数を含むため、最適化ソルバーなどで実用規模の問題を解くことは困難である。さらに、日単位年間(22日稼働/月で264期/年)とすると問題を解くのに膨大な時間がかかる(1回の計算に数十時間)。そのため期を月単位とし、 $I=2$ 、 $K=4$ 、 $T=12$ とした場合の $Y_{ikt}$ の組合せ(稼働パターン数)は $2^{96}$ であり、期ごとに運用最適化問題を分解できる性質を用いることで実用的に問題を解くことが容易となる。

今回は製品需要の特性から期の設定を月単位年間としたが、モデルの柔軟性をより重視する場合には、製品の特性(投資・需要)に応じて計画期間を短くし、時間を週単位、または日単位として問題を解くこともできる。

## 運用最適化問題 S

objective

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t \in H} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} O_{ij} x_{ijk} y_{ikt} \\ & + \sum_{t \in H} \alpha \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (CP_{1j} x_{1jk} y_{1kt} - CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt}) \\ & + \sum_{t \in H} \beta \left( \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt} - d_t \right) \end{aligned} \quad (3-7)$$

subject to

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CP_{1j} x_{1jk} y_{1kt} \geq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt}, \quad t \in H \quad (3-8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CP_{2j} x_{2jk} y_{2kt} \geq d_t, \quad t \in H \quad (3-9)$$

$$y_{ikt} \in \{0,1\}, \quad i \in I, k \in K, t \in H \quad (3-10)$$

この問題は 0-1 変数を含む組み合わせ最適化問題であるが、期ごとに問題を分離することができる特徴がある。制約式により、運用最適化問題 S の規模は小さくなり、最適化ソルバーでも解けるが、それでもかなり時間かかる。そのため、本研究では毎月の運用が独立している性質を用いて、 $t$  を 1 から 12 まで変化させながら汎用ソフトを用いて運用最適化問題を 12 回解くことにした。これにより組み合わせ数を減らすことができ、計算時間を短縮することができた。

### メインアルゴリズム

**Step1** サブアルゴリズムにより投資決定変数の実行可能解の絞り込みを行う。

**Step2** 充填工程の実行可能解  $\hat{x}_{2jk}$ ,  $jk \in JK_2$  を選ぶ。

**Step3** 乳化工程のすべての実行可能解  $\hat{x}_{1jk}$ ,  $jk \in JK_1$  について、**運用最適化問題 S** を解く。

**Step4** 最適解が改善されたら最適解と最適値を更新する。

**Step5**  $JK_2$  から充填工程の現在の実行可能解を削除する。

**Step6**  $JK_2$  に実行可能解が残っていれば **Step2** に戻り、実行可能解がなければ最適解と最適値を出力してアルゴリズムを終了する。

\*ここで、 $JK_1$ は工程1における設備タイプ $j$ と工程ライン $k$ の組み合わせ集合(例えば、{12,21,13,31...44})、 $JK_2$ は工程2における設備タイプ $j$ と工程ライン $k$ の組み合わせ集合をそれぞれ表す。

サブアルゴリズム：実行可能設備投資案の絞り込み。

**Step1**  $y_{2kt} = 1, k \in K, t \in H$  に設定する。

**Step2** 制約条件(3-2)を満たす、工程  $i=1, 2$  それぞれに対応する  $jk$  ペア集合  $JK_1, JK_2$ を重複する組み合わせを1つにまとめて作成する。具体的にはライン番号 $k$ だけに基づいて区別される組み合わせから $jk \in JK_1, jk \in JK_2$ ペアの値が大きいものを1つだけ残し、 $JK_1, JK_2$ を作成する。

**Step3** 制約条件(3-4)を満たす充填工程の投資決定変数 $x_{2jk}$ の組み合わせを実行可能解として選択する。

**Step4** 制約条件(3-3)(3-4)を満たす乳化工程の投資決定変数 $x_{1jk}$ を実行可能解として選択する。

### Step2 の補足説明

例えば投資決定変数の実行可能解  $X_{21}(x_{211} = 1, x_{242} = 1 \cap x_{2jk} = 0, jk \in JK_2 \setminus \{11,42\})$ と投資決定変数の実行可能解  $X_{22}(x_{211} = 1, x_{244} = 1 \cap x_{2jk} = 0, jk \in JK_2 \setminus \{11,44\})$ は重複組み合わせであり、残すのは実行可能解 $X_{22}$ である。

## 3. 4. 2 数値実験

本研究では月次需要データをもとに数値実験を行った。この需要データは最小60トン/月、最大180トン/月とし、一様分布に従う乱数として生成した。表3-1に1年間の需要の例を示す。

購入可能な設備のタイプは、

- ① 乳化工程で5タイプ(設備能力がそれぞれ100、200、300、400、

500kg/時)

- ② 充填工程で3タイプ（設備能力がそれぞれ 100、200、300kg/時）であるとした。

購入価格は、以下のように設定した。

- ① 乳化設備がそれぞれ 30,000 千円からステップサイズ 5,000 千円で増加し、最大値は 50,000 千円になる。
- ② 充填設備の価格は生産能力小さい順に、50,000 千円、70,000 千円、90,000 千円とした。

償却期間は乳化設備を含めていずれも 10 年とした。尚、本数値実験では計算時間の問題から 1 年間の需要データで実験を行うため、各期の投資費用は投資費用(購入費用)の各期の平均値（年、月）として算出している。

また、2 年目以降は需要に大きな変動が起きないことを前提として 1 年間の需要データで算出した投資最適解を 2 年目以降も適応して、運用最適解のみを算出することとする。

稼働費用はどの設備も同じで 8 時間稼働/日で 20 千円/日かかるとし、これらの設定を月の時間単位に換算（20 日/月、8 時間/日）してまとめたのが表 3-2 である。尚、係数  $\alpha$ 、 $\beta$  については 1 と設定した。同期化と柔軟性を重視する場合にはより大きい値に設定することもできる。

計算環境は、CPU：COREi7、メモリー：8G、OS：Windows であり、計算時間は最大 180 秒であった。

このような条件の下で実験用の月次年間需要を 10 回発生させ、最適な投資決定変数と稼働決定変数を求め、その時の費用を示したのが表 3-3 である。

表 3-1 1 年間の需要の例

月	1	2	3	4	5	6
需要 (kg)	126,207	143,801	78,934	123,955	174,987	165,393
月	7	8	9	10	11	12
需要 (kg)	153,834	95,347	60,000	180,000	97,582	170,942

表 3 - 2 パラメータ設定 時間単位：月

設備タイプ	設備能力(kg)		設備投資費用(千円)		稼働費用(千円)	
	乳化工程	充填工程	乳化工程	充填工程	乳化工程	充填工程
j=1	16,000	16,000	250	417	400	400
j=2	32,000	32,000	292	583	400	400
j=3	48,000	48,000	333	750	400	400
j=4	64,000	NA	375	NA	400	NA
j=5	80,000	NA	417	NA	400	NA

表 3 - 3 数値実験の結果 費用時間単位：年、能力時間単位：月

SN	費用(千円)					設備能力(工程1)			設備能力(工程2)			
	投資	稼働	同期化	柔軟性	総費用	ライン1	ライン2	ライン3	ライン1	ライン2	ライン3	ライン4
1	4,125	26,400	0	291	30,816	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
2	4,125	26,400	112	328	30,965	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
3	4,125	24,800	144	268	29,337	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
5	4,125	24,800	144	281	29,350	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
6	4,125	25,600	128	263	30,116	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
7	4,125	23,200	176	334	27,835	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
8	4,125	26,400	112	281	30,918	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
9	4,125	24,400	144	288	28,957	32,000	80,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
4	4,125	26,000	48	205	30,378	48,000	64,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000
10	4,125	26,000	48	281	30,454	48,000	64,000	80,000	48,000	48,000	48,000	48,000

表 3 - 3 から分かるように、最大需要を満たす工程 2 の設備の組み合わせは 1 つしかなく、工程 2 の最適解は 48 トン/月の生産能力を持つ設備 4 台を 4 つのラインに配置することである。一方、工程 1 においては実行可能な設備の組み合わせが複数存在しており、稼働費用、同期化費用、及び柔軟性費用に基づいて設備が選択されている。しかし、実験 4 と 10 以外はすべて同じ結果になっており、8 割の比率で設備タイプ 2 (32 トン/月) 1 台と設備タイプ 5 (80 トン/月) 2 台が選ばれているので、需要がランダムである場合には 32 トン/月の設備 1 台と 80 トン/月の設備 2 台を購入することが有利であると言える。

一方、48 トン/月、64 トン/月、及び 80 トン/月を選んだほうが生産能力の組み合わせのパターンの数が多いので、需要にパターンが見られる場合には注意深く数値実験を繰り返す必要がある。

### 3. 5 Y社の現状ラインの評価（事例研究）

本研究では、大手乳業Y社の主管工場を事例に既存設備の評価を行い、将来のスマート化に向けた考察を行う。本企業は数年前大規模自動化工場を建設し、プロセスチーズを中心とした乳製品の加工食品を生産している。製品は東名阪を中心に全国各地に販売されており、プロセスチーズは収益の柱となっている。

設置されている既存設備の構成は、以下のとおりである。

- ① 乳化工程 2 タイプ（連続式乳化機：設備能力 = 3500kg/時が 1 台、バッチ式乳化機：設備能力 = 1350kg/時が 1 台）
- ② 充填工程 1 タイプ（連続式充填機：設備能力 = 540kg/時が 4 台）

各設備の設備能力/月と設備投資費用/月を表 3 - 5 に示す。需要情報は卸業への出荷量であり、毎月の生産量の最大値と最小値には 2 倍の差がある。この変動はブルウィップ効果によるものと予想されるが、本研究の対象ではないので、卸業への出荷量を需要として事例検討を行う。表 3 - 4 に当該工場の数年前の 1 年分の出荷実績を示す。コンフィデンシャルなデータであるために、数値は線形加工を行った。尚、線形加工は足し算、引き算、及びスカラーの係数を掛けることを意味している。

毎月の稼働日数と時間については実際出荷していることを考慮し、欠品が出ないような日数にした（8 時間/日、22 日稼働）。設備の価格は市場価格、償却年数は 10 年とし、毎年均等に投資費用を計上することにした。稼働費用は人件費だけ計上し、正社員は 6,000 千円/年（500 千円/月）、契約社員は 4,200 千円/年（350 千円/月）とした。また、生産ラインはほぼ自動化されているので、作業人数は平均的な配置を前提に、1 つの充填設備には正社員 1 名と契約社員 1 名を配置し、乳化設備には正社員 1 名配置するとした。このような条件の下で設備能力、設備投資費用、稼働費用を計算したのが表 3 - 5 である。

ここで、実際設置されている設備タイプは工程 1 で 2 タイプ、工程 2 で 1 タイプであるため、工程 1 のインデックス  $j=3,4,5$  と工程 2 のインデックス  $j=2,3,4,5$  にはパラメータが設定されない（0 が設定される）。従って、表 3 - 7 の最適投資決定変数には  $j=3,4,5$  を含めないこととした

尚、同期化ペナルティ係数  $\alpha$  については乳化設備の稼働率の低下による損失、及び乳化後 90 分以内に次工程に流さなければ原料廃棄が発生することを考慮して設定し、乳化設備の過去の実績に基づいて、投資費用と原料廃棄費用を足して乳化設備の生産能力で割って計算した（ $\alpha = 26.3$  円/kg）。

柔軟性ペナルティ係数  $\beta$  については充填設備の稼働率の低下による損失のみを考慮して設定し、充填設備の投資費用を生産能力で割って計算した（ $\beta = 17.5$  円/kg）。

表 3 - 4 Y社主幹工場における 1 年間の出荷実績

月	1	2	3	4	5	6
需要 (kg)	263,483	257,382	293,122	229,554	250,903	234,366
月	7	8	9	10	11	12
需要 (kg)	260,127	332,805	323,385	150,775	267,350	264,557

表 3 - 5 設備能力と費用 時間単位：月

設備タイプ	設備能力(kg)		設備投資費用(千円)		稼働費用(千円)	
	乳化工程	充填工程	乳化工程	充填工程	乳化工程	充填工程
j=1	616,000	95,040	2,167	1,667	500	850
j=2	237,600	NA	2,917	NA	500	NA
j=3	NA	NA	NA	NA	NA	NA
j=4	NA	NA	NA	NA	NA	NA
j=5	NA	NA	NA	NA	NA	NA

表 3 - 6 稼働決定変数

$y_{ijk}$		t=1	t=2	t=3	t=4	t=5	t=6	t=7	t=8	t=9	t=10	t=11	t=12
i=1	k=1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
i=1	k=2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
i=1	k=3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i=1	k=4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i=2	k=1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
i=2	k=2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
i=2	k=3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
i=2	k=4	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0

表 3 - 7 最適投資決定変数

$x_{ijk}$		k=1	k=2	k=3	k=4
i=1	j=1	0	0	0	0
i=1	j=2	1	1	0	0
i=2	j=1	1	1	1	1
i=2	j=2	0	0	0	0

このような条件の下で最適解を求めた結果、以下のような結果を得た。

目的関数 = 190,559 千円、投資費用 = 87,000 千円、稼働費用 = 44,650 千円

同期化費用 = 48,760 千円、柔軟性費用 = 10,149 千円。

また、投資最適解 $x_{ijk}$ は表 3 - 7、運用最適解 $y_{ikt}$ は表 3 - 6 に示す通りである。

同期化費用と稼働費用の全体に占める比率が高くなっているが、これは同期化費用に含まれる原料廃棄費用が大きいこと、Y社の人件費の設定が高いためである。

また、同期化費用に係わる乳化と充填の工程間の能力差の比率((乳化能力 - 充填能力)/乳化能力)は  $t=1,2,4,5,6,7,11,12$  の時 0.4、 $t=3,8,9,10$  の時 0.2 であった。そして柔軟性費用に係わる充填工程の生産能力と需要の差の比率((充填能力 - 需要量)/充填能力)は  $t=1,2,5,7,8,9,11,12$  の時 0.1、 $t=3,4,6$  の時 0.2、 $t=10$  の時 0.5 であった。

この結果から分かるように、当該工場に設置されている  $j=1$  タイプの乳化設備(設備能力 616,000kg/月)は非経済的であり、単純計算では  $j=2$  タイプ(バッチ処理)の乳化設備を 2 台設置したほうが経済的であると結論付けることができる。 $j=1$  タイプの乳化設備は連続稼働しており、充填設備との能力のバランスが取れている場合にはより経済的であるが、充填設備の稼働率が日々変化したり、製品の品種が頻繁に変更される場合には  $j=2$  タイプの乳化設備が有利であると言える。

現在、当該工場に設置されている  $j=1$  タイプの設備 1 台と  $j=2$  タイプの設備 1 台にて、運用の最適化を試みたが、すべての組合せにおいて以下の結果を得た。

目的関数 = 258,264 千円、投資費用 = 109,500 千円、稼働費用 = 39,150 千円

同期化費用 = 99,465 千円、柔軟性費用 = 10,149 千円。

今回の事例においては  $j=1$  タイプの乳化設備 1 台だけ稼働させればよく、 $j=2$  タイプの設備は完全に余分な投資となっていた。

しかし、現状では  $j=2$  タイプが設置されているので、著者らの経験に基づいて分析したところ、以下の 2 つの理由をもって正当化することは可能であると考えた。1 つは  $j=1$  タイプ乳化設備のトラブル対策、もう 1 つは需要が増えたとき、充填設備の稼働時間を 16 時間(2 直)または 24 時間(3 直)に延長して、全工場の生産ラインの能力を向上させることである。

本研究の事例では、乳化工程の生産能力が 853,600kg/月(1 台の 1,350kg/時と 1 台の 3,500kg/時が 8 時間/日 22 日/月稼働)、充填工程の生産能力が 380,160kg/月(4 台の 540kg/時が 8 時間/日 22 日/月稼働)であるので、乳化設備を 8 時間/日バッチ稼働させ、充填設備を 2 ライン増設しても問題なく、その時の最大生産能力は 760 トン 320kg/月である。

実務では生産能力をフル活用することが多く、稼働時間を 12 時間、あるいは 2 直 16 時間で稼働させる場合がある。このような稼働時間上限の変動に対応させるため

の生産計画の作成方法も考えるべきであると考え、本章の研究では稼働時間を12時間に設定して計算して見たところ、実際のデータを線形加工しない場合でも最適解が同じであることを確認した。

実際は2直で動かす場合、残業で対処する場合、そして前倒し生産を行う場合などがあり、残業だけで対処するならば平均4時間残業/日(12時間/日稼働)すれば良いことになる。

また、選択可能な設備を増やして実験を行ってみたが、現状市販されている充填設備の最大設備能力が540kg/時であるために、フル稼働している現在では540kg/時より設備能力が小さい設備が選ばれることはなかった。一方、乳化設備も実際過剰能力になっていたため、新しい設備が選ばれることはなかった。

本章の事例研究から解ったことは、設備の投資費用より運用費用が大きいことである。そして工場の運用費用は、特に充填設備の稼働を最終需要に合わせて調整し、乳化設備の稼働を充填設備の稼働に合わせて調整することで、大きな節約ができることを意味する。

### 3. 6 本章研究の結論

本研究では、スマートファクトリーにおける生産ライン設計問題を対象とし、設備投資に関するモデルを構築すると同時に、解法を開発し、数値実験を通じてその有効性を示した。

具体的にはプロセスチーズの生産ラインにおける主要工程である乳化工程と充填工程を対象に、設備の選択をスマートファクトリーのライン設計問題としてとらえ、目的関数には設備投資費用、稼働費用、同期化費用、及び柔軟性費用を含めてモデルを構築した。充填工程において生産指示に対して欠品を出さないこと、乳化工程は充填工程に乳化チーズをシームレスに供給できること、また、生産ラインの数は事例研究対象工場の現状を考慮して最大4つであることを制約条件とした。

この条件の下で、設備の投資費用、稼働費用、同期化費用、柔軟性費用を含む合計費用を最小にする最適投資決定変数 $x_{ijk}$ と運用決定変数 $y_{ikt}$ を求めることにした。

本研究のモデルは2次整数計画であり、組み合わせ爆発が起きるために、市販のソフトウェアでは実用規模の問題の最適解が求まらないという問題がある。しかし、投資意思決定においては需要の最大値を満たすように充填工程の設備の組み合わせを決めることができれば、同期化ペナルティを最小にする乳化設備の組み合わせの数も限定的であるので、この特徴を用いて提案モデルの解法を開発した。

提案解法では、対象問題を投資最適化問題と運用最適化問題に分離し、投資最適化に対しては制約条件を満たす実行可能な組み合わせをリストアップし、それぞれの組み合わせに対して運用最適化問題を解くようにした。その結果、3秒程度で1つの投資最適解候補に対する運用最適化問題を解くことができ、実用的な時間で提案モデルの最適解を求めることができた。

また通常の設備投資問題では、工程の総生産能力でラインバランスをとり設備台数と設備能力を決定することが多い。この場合、複数台の設備を購入するよりは1台の方が安価の場合が多く、稼働費用である人件費も台数に対して増加するため、能力の大きい設備を選定し台数を減らす傾向がある。また、稼働によるロス費用が考慮されないことが多いため、本モデルでの目的関数、特に運用費用が最適化されない可能性が大きくなる。本研究では、より経済性を重視するためにロス費用をペナルティ費用として加味し、投資決定と運用決定をした場合に設備台数と設備能力の組合せが変わることがあることを指摘している。

本モデルは2工程間の設備の組み合わせを決定する研究であるが、スマートファクトリー全体の設計の中では、RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industrie 4.0) に提示されている階層に基づいて、生産ラインのブロック化、及びこのブロック化をベースにした階層化、水平化に発展させる基礎的な研究でもある。これは、最近よく用いられている用語を使うと設備のモジュール化[57][54][117]、そして情報連携のための管理シェルの設計に貢献できるものである[102]。

また本研究では生産ラインを4つに限定しているが、需要の最大値が大きい場合や、需要の変動が激しい場合には生産ラインを増やし、設備の組み合わせを増やすことで、総費用をさらに削減できると考えられ、今後の課題としたい。

## 第 4 章 食品工場における水平階層型システムモデル の研究 (プロセスチーズ製造での事例研究)

### 4. 1 はじめに

本章では、インダストリー4.0 の概念に合致し、食品工場におけるスマートファクトリー構築に貢献でき、ライン拡張や効率的工場運用に対しても有効である水平階層型システムモデルの構成とその機能、効果を、プロセスチーズ製造工場での事例を基にして提案する<sup>3</sup>。

尚、本提案モデルは事例研究であり、新規アーキテクチャや新規コンポーネントの提案ではない。提唱されているシステムアーキテクチャやコンポーネントを、スマート化をめざす食品工場に適用するために改良応用したモデルである。本モデルでは定性分析と定量分析の組合せを述べ、食品工場全体の製造システム構築のための設計基準を提案する。これは食品工場への実用モデルとして新規性がありスマート化へ貢献するものである。

#### 4. 1. 1 本章の概略

日本の食品工場は、深刻な労働力不足と需要の多様化と増加のために深刻な課題に直面している。食品工場の製造システムは、将来的に拡大する市場規模と製品の多様性に対処するために、より効率的かつ柔軟性を確保する必要がある。それらを向上させるためには、第3章で提案しているライン設計の最適化と共に、インダストリー4.0 及びスマートファクトリー概念とコンポーネントを導入した、自動化技術と自動制御システムが製造システムに実装されるべきである。

---

<sup>3</sup> 本章の一部は、International Journal of Production Economics 誌に掲載されている。

Takao Matsumoto , Yijun Chen , Akihiro Nakatsuka , Qunzhi Wang : "Research on horizontal system model for food factories: A case study of process cheese manufacturer", International Journal of Production Economics, Vol. 226(2020)

そして、日本では、インダストリー4.0の拡張バージョンであるソサエティ5.0が2016年に提唱されているが、これを推進するためには経営科学と生産経済学の理論に支えられた自動機械、ロボット、その他の情報技術（IT）が開発導入されていくべきである。

これに対して、現在のすべての活動、国家プロジェクト、及び新しい生産システムの開発の試みは、多くの優秀な企業から提案され蓄積された慣行に基づいているが、標準化や統合化はできていないのが現状である。

実際、20年前に同様の活動、いわゆるCIM（computer integrated manufacturing：コンピュータ統合生産）、FMS（Flexible Manufacturing System：フレキシブル生産システム）が推進された。ロジスティック分野では、90年代初頭にDoD（米国国防総省）によって提案され応用分野が拡大していった、現在のCALS（continuous acquisition and life-cycle support：生産・調達・運用支援統合情報システム）がある。

インダストリー4.0は、これらすべてのアイデア、実践、成功事例や失敗を含む経験を統合し、強力なITサポートを活用し、経営科学とエンジニアリングから得た知恵を使用している。インダストリー4.0、AMP（advanced manufacturing partnership：先進製造パートナーシップ）、ソサエティ5.0は、ドイツ、アメリカ、日本の国家戦略であり、その後、中国によるMade-in-China 2025など、他の国々が提唱した他の多くの国家戦略が続いている。これらの一般的な用語はすべて、詳細システム設計のない国家戦略であるため、この戦略に取り組む企業は、自社の能力、製品、顧客、その他の利害関係者に基づいて具現化するための基本構想と実現すべき詳細内容を策定する必要がある。

本章の研究は、現在、日本の最先端である乳製品工場の具体的な事例に焦点を当て、食品工場に適合した製造システムの全体的な設計について、実際のシステム構築の実践に基づいて、製造システムの高効率化と迅速な統合を実現することを目的とした自動化技術を備え、設備単体からプラント全体管理、全社システムまでを、5階層に水平に分割した水平階層型システムモデルを提案する。そして、数値解析を実施して、提案システム設計全体の有効性を検証する。

本システムモデルは、従来の垂直型システムに対して、インダストリー4.0が提唱している、製造方法、制御ロジック、製造ノウハウ、製造管理等の標準統合化に貢献する。そして、水平階層型システムモデルの各階層では、OT、MTとITの機能役割を明確にし、プラントにおけるシステム全体の最適化を実現するものとする。つまり、このシステムモデルはスマートファクトリー構築に向けて高い生産効率を実現し、類似の工場に展開可能な、設計リファレンスを提供可能にするものである。

本章の構成と内容は、次の通りである。第1節でプロセスチーズ製造の特徴と問題点及び垂直型システムモデルの問題点を述べ、第2節で関連文献をレビューする。第3節で水平階層型システムモデルの配置、仕様、各階層の機能を説明し、第4節で、各階層の機能評価を述べる。第5節では、類似の食品製造工場を含めた事例から、コストと労働時間の数値計算を通じて食品工場向けに提案された水平階層型システムモデルの優位性を数値検証する。

評価した機能は、以下の通りである。各階層のユーザーインターフェース(U I (User Interface))と操作機能及び見える化機能、各階層で蓄積するノウハウ、トレーサビリティの確保、ロボット管理制御、各階層のデータのレベルとO T及びM TとI Tの対応、サイバーとフィジカルの階層別区分である。また、数値検証は、垂直型・水平階層型のシステム導入及びシステム更新時の費用比較を実施した。

以上、本研究は、新しいシステム構成モデルの提案とその理論的分析と評価の事例研究である。

#### 4. 1. 2 プロセスチーズ製造でのシステム化の留意点

乳製品の中でも、プロセスチーズ製造は量産ラインの自動化は進んでいる一方、多品種少量生産ラインの自動化は進んでおらず、依然として労働集約型が多い。よって、昨今の労働力不足という課題に対して、I Tやロボット技術を導入した自動化による効率化が求められている。さらに、I Tやロボット技術の活用範囲を、労働力不足の課題解決に限定するのではなく、プロセスチーズ等食品製造システム全体の最適化に拡張し、食品工場に導入するシステムはどのような形態が望ましいかを考察する必要がある。

プロセスチーズの製造工程では、連続プロセス製造とバッチプロセス製造の組合せ形態は多岐に渡っている。更に製品ごとに製造日付管理が必要であり、個々の需要を満たすために、最終製品の組み合わせも異なり、日々の製造は複雑になる。また、製造プロセスを制御すると共に、データを収集して各製品を追跡する必要があるため(トレーサビリティの確保)、生産計画作成とプロセス制御は複雑になり、その結果工場全体の製造管理は複雑になる。以上のような状況から、プロセスチーズ製造プロセスの以下のような問題点に対するシステム化が必要である。

##### (1) 生産性の損失と製品ロス

連続製造プロセスでは、各処理装置が所定の期間連続して稼働し、バッチ製造プロセスでは、各処理装置の生産能力に応じて、バッチの生産が繰り返される。通常、さまざまなタイプの製品がグループ化され、特定の各製造ラインに割り当てられる。

連続製造では1日単位で製品は製造されるが、バッチ製造では1つのバッチの生産後、別の製品を生産するために品種を切り替えることがある。この品種切替時には、M I Xロスが発生する。ロスの量はほぼ一定量のため、バッチサイズが小さい製品ではM I Xロスの比率が高くなる。

また、製品切替は複数のパターンがあり、熟練した作業員でないと作業ミスが発生率が高くなる。このため、作業の標準化とシステムによる的確な作業指示は重要な課題である。

製造ライン全体には様々な検査工程があるため、要員対応が必要となり検査要員には判定能力が求められる。検査に不備が発生した場合、製品は出荷止めにしなくてはならず、大きな製品ロスが発生する。

そして、検査結果、製造状況、設備稼働状況等はトレーサビリティ確保のため記録を残す必要があるため、製造管理業務は煩雑であり大きな工数を必要とする。そのため、検査の自動化とシステム判定、製造管理業務のシステム化は生産性向上とミス防止に対して大きな効果が期待できる。

## **(2) 生産における高い柔軟性の確保**

製品の物性はM I X製造の段階で大きく変化するため、製品の品質（粘調度、含水率、MIX成分値等）は、原材料調合（ミキシング）、乳化、M I X保持、充填後硬化での物性制御の影響を強く受ける。また、製品歩留りにも物性制御は大きく影響する。また、同じ製品であっても投入される原料チーズの配合と配合される各原料チーズの物性は異なっている場合が多い。よって、物性コントロールをする各製造パラメータの設定と管理は非常に重要であり、そのパラメータは常に一定ではなく、製品の物性をモニタリングしながらパラメータ調整をしていけるような柔軟な製造システムが必要となる。

また、同じM I Xを使用する製品であっても、最終形状に応じて異なる充填機に流下し、同一形状の製品は、異なるM I Xを同じ充填機に流下する。

そのため、乳化機と充填機は複数の組合せで運転されており、その日の生産計画によって決定される。よって、複数パターンの乳化機と充填機の組合せでの能力バランスは同期がとられている必要があり、乳化工程と充填工程は連動して機械制御を行うため制御システムは複雑になる。この能力バランスがうまく同期していないと乳化工程でのM I X保持時間制約による製品ロス、充填機のM I X供給切れを起こし稼働率の低下と製造量の計画未達成を引き起こす。計画上同期がとれていても、充填機の稼働状況がトラブル等で低い場合は、連動している乳化機の流量制御やバッチ量調整をして同期がとれるように制御しないと製品ロスを発生させてしまう。

以上のことから、第3章で提案したライン設計モデルを活用して設備運用を考えることは有効であり、生産計画は、設備同期と製造柔軟性を充分考慮しなければならない。

#### 4. 1. 3 食品工場の区分

本論文では、食品工場の区分を以下のように設定し、その構成を図3-1に示す。

- ① **ライン**：製品群別に各製造設備を垂直に連動させ（例えば、充填→カートニング→ケーシング→製品検査）、製造を実施する単体製造ライン（例 プロセスチーズ充填包装Aライン）
- ② **エリア**：ラインを前工程と後工程に分けたプラント内の場所区分であり、類似した複数のラインが属する（例 プロセスチーズ充填包装エリア）
- ③ **プラント**：前工程、後工程を併せた製造場所（例 プロセスチーズ製造プラント）

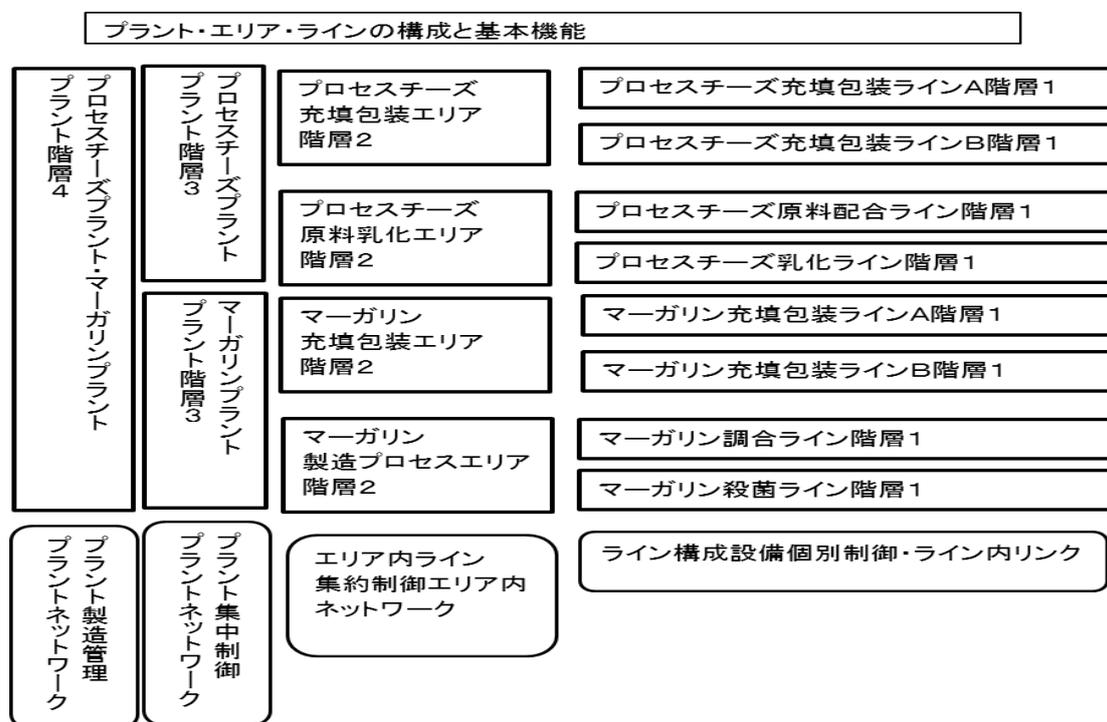


図 4-1 プラント・エリア・ラインの構成と基本機能

#### 4. 1. 4 垂直型システムモデルの問題点

従来の乳製品生産は垂直に統合されているため、大量生産でより高い生産性を維持している。新しい製造ラインや設備を工場に導入する場合には、生産プロセス全体の効率化を考慮して、費用と時間をかけて製造ラインを再構成する必要がある。新規導入する製造ラインの設計と設備の構成は、製品の品質特性とライン設備の特性によって最適化を考慮したラインが決定される。その結果、エリア間・ライン間（以下、水平方向）が考慮されていない場合、製造ラインごとに製品特性がわずかに異なる場合、各製造ラインは異なる機能を持つ。よって、類似したライン構成であっても、水平方向でシステム構成機器が異なったり、システム構成の垂直の各階層の役割が異なったりと、それぞれのシステムが独立しており、個別ラインでの個別最適化となっている。

よって、垂直生産ラインの制約がしっかりと固定されているため、制御ノウハウや設備パラメータ設定等を他のラインにマージナルし類似ライン全体の効率化や、最新方式に更新することは困難である。

水平方向を考慮した製造システムでは、計装リンク（P L C（programmable logic controller）や各デバイス信号をネットワーク線でリンクさせるもの）やネットワークプロトコルにおいて、データ連携や設備設定の統一化が容易にできる。本節では、垂直型プラントシステムの問題を以下のようにまとめる。

##### （1）設備の運転操作方法と制御ソフトウェアのメンテナンス（改修）

エリア内やエリア間において同様なライン構成であっても、ユーザーインターフェース（以降、U I）が異なれば、ライン設備の運転操作方法は異なり、不統一になる。これは、複数のラインを作業者が運転する場合、ヒューマンエラーによる誤動作につながる。

また、制御ソフトウェアも機能と役割が異なり、メンテナンスや改修時には、別々のツールとロジックが必要となる。これは、独立したメンテナンスと作業工数の重複を発生させ、コストと時間が増加してしまう。

##### （2）生産計画データの作成と計画データのラインへの設定

生産計画データと制御パラメータデータを設備に設定するには2つの方式がある。システム連動ができている場合は、各データがローカルエリアネットワークを介して各ライン設備に接続され、システムにより各ライン設備に自動設定される。そして、システム連動によるデータ連結ができない場合は、各ラインの設備ごとに手動でデータの設定をする必要がある。垂直型システムの場合は、各ラインのシステム仕様が異なっていることが多いため、データ設定の方式が混在している。

また、ネットワークが繋がっていても、上位システムとのインターフェースのプロトコル仕様が異なっていることが多いため、上位システムで生産計画をデータ化しても、直接製造工程に反映できる場合と、別途必要なデータをラインのシステムで作成しなければならない場合がある。さらに、データフォーマットがラインの水平方向で異なるとライン間のデータ連携プログラムが必要となり、共通モジュール化が困難になる。

よって、このような垂直型システム構成の場合は、ライン設備へのデータ設定を手動で行うことが多く、オペレーターが各ライン設備のパラメータの設定や変更を実施し、特定の製品品質を保証することになる。

### **(3) 設備管理データと製造管理データの不統一**

各設備の制御は、通常各設備メーカーによって標準化されている。そして、各設備の制御ロジックは、多くの場合、設備メーカーの制御ノウハウとしてブラックボックス化されていることが多い。よって、異なる設備メーカーの各設備では、取得する信号データ（運転状態値、稼働実績記録、故障発生記録等）の粒度が異なる。このため、垂直型システムでは、ラインの水平方向でのデータ粒度の統合をしていないため、ホストの製造管理システムで全てのデータを統合して分析し、品質、コスト、稼働率等を改善することは困難である。

### **(4) 設備増設時及び更新時の対応の困難さ**

新しい製造ラインの導入や更新をする時に、ライン制御のシステムが、クローズドシステムになってしまうことが多く、工場システム全体を最適化することが困難である。また、プラントを管理制御する計装システム設備の更新時も現行の垂直型プラントシステム構成を継承する 경우가多く、エリア間でのシステム連携が困難である。

### **(5) トレーサビリティの確保**

垂直型システムでは、他のエリアとのデータ連携が取りにくくなる。また、製品に使用された原材料資材等が、ライン制御とは別システムのシステムで管理されている場合は、トレースデータの安全性を確保するために、トレーサビリティ専用のシステムを別途導入してトレースデータを確保する必要がある。

### **(6) 全社ネットワークとの接続**

垂直型システムでは、全てのエリアのシステムが会社全体のネットワークとデータ連携されているわけではない。よって、部分的なエリアデータしか連携できず、会社全体のネットワークにデータを送るために、適切に必要な情報を準備し、各エリアのデータ形式を調整する必要があり、不足情報の入力業務やデータフォーマットの整理等、作業負荷が大幅に増加する。

### (7) システム構成の複雑化

各製造ラインとエリアのデータを統合して会社全体のホストシステムに連携させる場合、異なるエリア間でデータを調整する必要があるため、エリアシステムの上位に工場全体管理用のサーバシステムを導入しなければならない。よって、プラント全体のシステム構成が複雑になる傾向がある(図4-2)。

以上の問題を解決するために、工場全体のシステムをいくつかの階層に分割し、まず各階層で水平に接続(統合)し、次に各階層を垂直方向に接続してシステム全体を統合し、各階層に役割、機能のルールを定めて運用する水平階層型システムを提案する。

垂直型システム構造であると水平連携がとりにくく、ネットワークプロトコル・データベースの一元化が困難

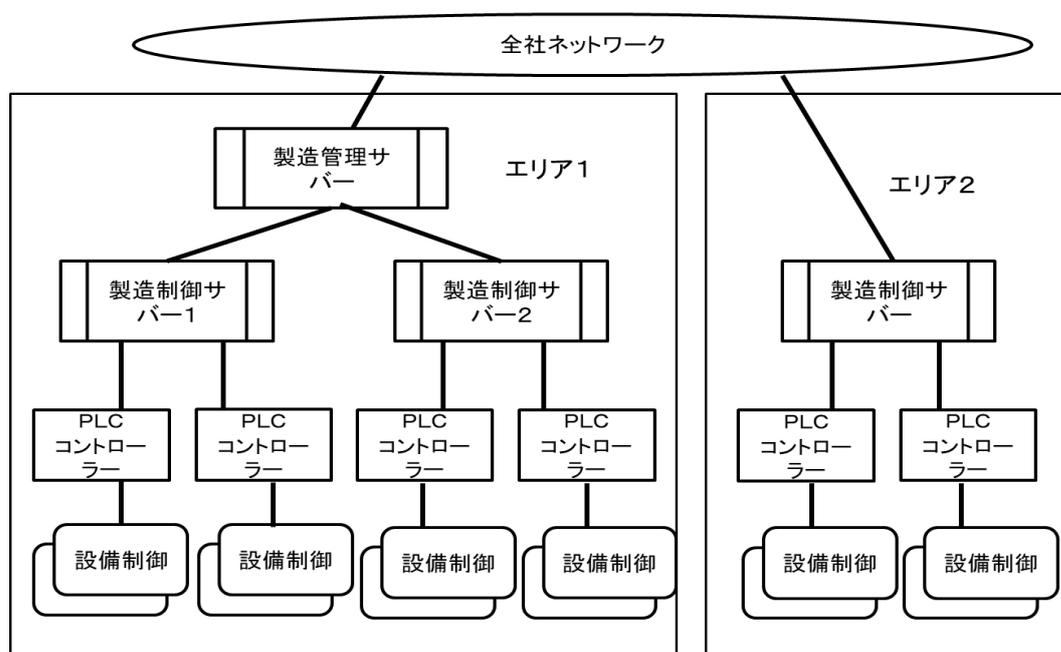


図 4-2 垂直型製造システムの構成

## 4.2 既存研究 (文献レビュー)

インダストリー4.0 のコンセプトを満たす工場には、スマートファクトリーの関連研究、製造におけるインテリジェントテクノロジー、及び高度な製造システムのアプリケーションが不可欠である。よって、第2章でインダストリー4.0、スマートファクトリー、インテリジェントテクノロジーの関連文献をレビューしている。本

章では、多くの製造システムが準拠している I S A 95 モデルと制御システム ( P L C、D C S、M E S ) についてレビューする。

#### 4. 2. 1 I S A 9 5 システムモデルとデータ連携

構築された多くの産業システムは、階層制御レベルを指定している I S A 95/ I E C 62264 標準 (ISA95) に準拠している。物理的な生産プロセスの 4 つのレベルは、以下のように定義されている [119]。

- ① デバイスレベル：センサー等のフィールドデバイスによる製造工程の検知及び設備を直接操作するレベル。
- ② プロセス制御及び監視レベル：制御コントローラーによる製造工程の自動制御とデータ収集システム、S C A D A (Supervisory Control And Data Acquisition) による製造工程のモニタリングと管理を実施するレベル。
- ③ M E S により製造工程を最適化する製造実行レベル。
- ④ エンタープライズ管理レベル：E R P (Enterprise Resource Planning) システムにより、ビジネスプランニング、生産計画作成、及びビジネスロジスティクスを実施するレベル。

しかしながら、I S A 95 に続くソリューションは、P t P (Point-to-Point) 統合に基づいたものになるであろうという提案がある。この提案によると、常態的に接続されたネットワークの接続数は、アプリケーションの数とともに二次的に増加する。そして、新しいアプリケーションを追加する場合は、その都度他の全てのアプリケーションを更新して新しいアプリケーションと連動する必要がある。よって、既存の手順に新しいシステムまたは機能を追加すると、システム全体の迅速な統合が困難になる [120]。

さらに、もう 1 つの課題として、垂直統合と呼ばれる I S A 95 の異なる階層間の通信方法がある。産業界での一般的な通信ソリューションは、制御機器とアプリケーションを連動させるための標準化仕様である O P C (Open Platform Communications) を使用してネットワーク経由で各デバイスにアクセスする。O P C のみを使用する場合の主な問題は、それが P t P ソリューションになっていく傾向になることである。例えば、P L C 変数の構造は、接続している他の多くのデバイスやアプリケーションで共有されている必要があり、この問題を解決するために、多くの企業は、O P C を介してアクセスされるデータを集約及び変換するための多くのロジックをデバイスに追加している [120]。

しかしこのことは、P L C の変数構造を共通化していかなないと、デバイスやアプリケーションのソフトウェア資産が増大していき、標準化を困難にする危惧がある。

また、P t Pアプローチはビジネス要件を十分にサポートしていないという指摘がある[121]。そして、自己完結型アプリケーションが、他のアプリケーションと接続して使用可能するためのサービスとして、オープンアーキテクチャーを提供する分散ソフトウェアアーキテクチャであるS O A (Service-Oriented Architectures) の登場により、ソリューションの移行が大幅に加速されたことが報告されている[121][122]。

S O Aアプリケーションは、その潜在能力を最大限に引き出すために、ライブラリ化されたもので、自己記述型であり、且つ検出可能で、プラットフォームや言語に依存しない必要がある。このことは、個々のコンポーネント同士は相互に連携しているが、相互に依存している余地が少なく、コンポーネント間の連携をあまり顧慮せずそれぞれのコンポーネントを交換したり改良したりするような柔軟な対処を行うことができる疎結合になり高い柔軟性につながる[120]。

#### 4. 2. 2 制御システム (P L C、D C S、M E S)

簡単に言えば、P L Cは、製造プロセスを自動化するために使用される耐久性のあるコンピュータである。D C S (distributed control system) は、頑丈なコンピュータコントローラを備えている点でP L Cに似ているが、D C Sはシステム全体に専用の分散された複数の自律コントローラを有しており、製造プロセス全体の自動化に使用されることが多い[123]。

D C Sの大きな利点は、今日のS C A D Aシステムに似た統合監視制御システムであることであり、制御信号がタグベースでプロセス制御用にすでに作成されており、監視及び制御画面で使用できる。また、D C Sには機能ブロックごとにプログラミングツールがあることも有益であり、この機能ブロックプログラミングは、多くの時間と冗長なプログラミングを節約した[123]。

40年前のP L CとD C Sは本質的な違いがあり、大規模で連続したプロセスを自動化する場合はD C Sが選択されていた。

しかし、今日の産業では、統合された監視と制御機能で、D C SとP L Cは非常によく似ている。それは、オープンソース通信、光ファイバー、イーサネットなどにP L Cが対応できるようになり、多くのP L Cが相互に通信し、ネットワークを介して他の自律コントローラと通信する自律型P L Cとして動作するようになったためである。その幅広い通信は、1つのP L Cによって制御される単一または複数のプロセスが別のP L Cと通信することを可能にした。そして、接続されたP L Cシステムは、D C Sとほぼ同じセキュリティと堅牢性を持つが、1つのP L C

でプラント全体を制御することはほとんどない。アイスクリームサンドイッチ製造の例では、PLC-Aは、アイスクリームバッチを処理し、バッチが完了すると、PLC-Aはプロセスが完了したことをPLC-Bに送信し、その後PLC-Bはフリーズプロセスを開始する。このように、今日の技術では、幅広く頑丈なPLCシステムが、DCSとほぼ同じことを実現できることが解る。現在のPLCシステムは、監視制御とデータ収集(SCADA)を除いて、DCSとほぼ同じものを提供している。よって、PLCシステム(プラント内の複数のPLC)では、監視制御システムを作成する必要があるため、個々のPLCシステムのデータはSCADAシステムを使用してデータベース化する必要がある。

今日の技術では、DCS及び複数のPLCいずれのシステムでもプラント全体を制御することができるため、システム導入の最適な決定を下すためには、システムコストと長所短所を勘案する必要がある[123]。

インダストリー4.0の概念における3つの側面は、自動化、スマートな機械、及びデータ処理である。その目的は、スマート製造システムとデジタルファクトリーを構築することであり、そのためにはデータ処理技術の発展が鍵となるであろう。

スマート製造システムとデジタルファクトリーを実現するための、PLC制御をインテリジェント化するソリューションとして、シーメンス社は国際通信規格のTIA(Totally Integrated Automation)ポータルを提唱している。TIAポータルは様々な機器を統合するために使用されるものである(PLC、HMI(Human Machine Interface)、リモートI/O、ロボットアーム、画像処理システム、バーコードスキャナ、インバーター等)。つまり、従来の機械装置をよりスマートにすることができるものである。但し、その場合、各機器にはデータ共有メカニズムが備わっている必要がある[124]。

そして、このような標準化されたポータルを使用することにより、実際のデジタルファクトリーオペレーションの5つの主要な構成要素である、①統合基幹業務システム(ERP)、②物流管理システム(ロジスティクス)、③PLM(Product Lifecycle Management)、④MES、⑤制御システムは、高度に標準的なネットワークシステムを使用して相互に統合され、マシン間で最適化タスクを継続的に実行することができる[124]。

工場での主となる製造制御は、メイン制御システムとしてDCSタイプのシステムで制御される。これに対してユーティリティ(水処理、空調設備、電気設備等)を制御する補助システムは、通常、設備に付属の専用PLCを介して制御される。そして、これらの補助システムは、通常、ネットワークインターフェースまたはハードワイヤリングを介して、DCSタイプであるプラントのメイン制御システムと連動し制御される。この制御手法は、プラント制御システムが特定の補助アプリケ

ーション要件（ユーティリティ制御等）を満たせない場合に採用すると有効である。また、この方式は、設備サプライヤーが設備のパフォーマンスを保証するための必要性によっても推進される[125]。

PLCアプリケーション資産の数は膨大である。Control Engineering 誌の調査によると、PLCの主なアプリケーションには、機械制御(87%)、プロセス制御(58%)、モーション制御(40%)、バッチ制御(26%)、診断(18%)、及びその他(3%)となっている(単一の制御システムに複数のアプリケーションがあるため結果は合計で100%になっていない)。PLCは、主要な制御機器メーカーによってスタンダードな機器として世界中で製造及び販売されている。さらに、より専門的な様々な企業が相手先ブランド供給(OEM)アプリケーション用のPLCを製造している[126]。

インダストリー4.0のアーキテクチャに対応するPLCは次のことを求められている。ムーアの法則が着実に進んでいるおかげで、今では大量の処理能力を自由に利用できている。この処理能力により、企業はテラバイト単位またはペタバイト単位のデータ(ビッグデータ)を処理して、意思決定を強化し、新しい洞察を生成し、プロセスを最適化することができるようになった。

しかし、インダストリー4.0は、PLC市場で勝つために必要なものを根本的に変えている。PLCへの要求は、より省スペースでより多くの機能を必要としている。つまり、PLC本体やパーツのさらなる小型化、より高いI/O密度、及び高度な機能が必要となる。この問題はムーアの法則では解決できない。

よって、これらのシステムへの大量の要求は、PLCエンジニアが、目の前にある統合の問題を無視することをできなくしている。つまり、PLC開発が機能の量に依存している時ではなくなっているということである。そして、より高いレベルのコンポーネント統合を体系的に求めるエンジニアは、インダストリー4.0によってもたらされる効果を追求することを求められている[127]。

また、以下のような指摘がある。インダストリー4.0による現在の製造自動化環境では、エンタープライズ接続とHMIを有効にした高性能の制御システム(DCS、PLC等)が必要となる。今日、複数の国際的なインダストリー4.0はCPSに依存しており、スマートマニュファクチャリングを実現し、そのために、M2Mによるマシン間及びエンタープライズシステムに接続するインターフェースシステムを活用している。そのために、PLCをインダストリー4.0に対応させるには、根本的なPLCの再設計に対して以下のような新しい課題が伴う[128]。

#### ① 高性能制御

スマート製造環境では、P L Cが命令の処理、割込処理し、統合されたH M Iのサポートに対して、これまでにない高速性をサポートする必要がある。その結果、複数のコアを備えたより強力なプロセッサが使用されるようになり、コストと電力消費が高くなっていく。

#### ② 高度な接続性

異種マシン間のM 2 M(Machine to Machine)接続には、単一のP L Cシステム内に新しい標準ベースのイーサネット規格 (IEEE 802.1 TSN など複数の産業用イーサネットプロトコル) が機能する必要がある。また、エンタープライズ接続には、アプリケーション相互運用のフレームワークが必要となる。

#### ③ 通信安全の確保

工場の外部のネットワークに接続されているP L Cはサイバー攻撃に対して脆弱であり、セキュリティが大きな懸念事項になる。

#### ④ 異なったプラットフォームの相互運用性

多様なシステム間の機能的な相互運用性には、独自仕様ではないC P Uのプロセッサコア上で実行される標準化されたオペレーティングシステムが必要となる。

以上の4点が、インダストリー4.0 に対応していくべきP L Cや制御コントローラーに対する要求課題となる[128]。

制御システムのエンタープライズネットワークとリモートアクセスの推進については、以下のような意見がある。

H M I (Human Machine Interface) – P L Cによる製造での情報交換による情報共有等は、工場に適用される産業用イーサネットの出現により、生産性を大幅に向上させている。インターネットと拡大するウェブを介してインターフェースできるデバイスは、設備診断の改善、トラブルシューティングの高速化、及び機械の信頼性の全体的な改善を推進することが可能である。つまり、イーサネット接続が可能であることにより、問題の診断と修正に関連する時間とコストの削減が期待できる。これらを実施するためのシステム変更は、設備の自動化システムにも影響を与えるため、設備運転の自動化アーキテクチャとそのシステムにおけるP L CとH M Iの役割を再検討することが必要となる[129]。

ただし、P L Cをイーサネットでコンピュータと混在させる場合には、H M Iだけでなく、コンピュータとの役割機能及びデータ管理を制御階層に応じて検討し、標準化する必要がある。

次に、M E Sについて分析する。M E Sのスマート化と発展的な改善には、透明性、応答性、コスト効率という、3つの要素が重要な役割を果たす[130]。透明性を高めるためには、システムでビジネスの統合を構築し改善することが必要となる。こ

れにより、財務部門と製造部門間のコミュニケーションが改善される。システムの応答性は多くの場合、データフローの速度を示す。応答時間の増加の問題や予期しないシステムイベントの発生をより迅速に検出し、問題が広がる前に問題を特定することが応答性の解決に役立つ。そして、MESは全てのMES機能の基盤となっているシステムのツールを最適化して提供する必要がある。この最適化により、リソースと時間が節約され、最終的にコストを削減する[131]。そして、スマートMESはRFIDにも対応することが必要であり、以下の5つの主要な機能を組み込むことが提唱されている[132][22]。

① データ収集とシステムへの取得

この主要な機能は、設備及び作業員からリアルタイムで工場の各フィールド及び製造現場からデータを自動的に取得するための方法としての機能である。

② プロセス管理

自動設備またはスマート機器から取得した情報を解析し、各設備、機器に指示情報を出力することによって、運転中の製造工程の修正及び改善をし、製造を監督する機能である。

③ リソースの割当てとステータス

工場が使用する主なリソースである、熟練作業員、原材料資材、機械及び生産工具等を監視するための重要な手段として機能するものである。この機能の中には、上記のリソースのステータスも表示も含まれる。

④ オペレーションと詳細スケジュール

オペレーション重要性、製造設備への依存度、及び生産制約条件や生産順序制約に基づいて各設備の運転計画を作成し、運転条件を整理設定する機能であり、これに使用されるアプリケーションツール類が必要となる。

⑤ パフォーマンス分析

企業活動における、過去の実績値と将来の目標値の両方を比較し、意思決定、効率の向上、及び改善を支援するためのデータ分析機能であり、製造システムの重要なツールである。

また、MESにおけるUIの在り方については、以下のような基本設計が有効である[132]。

MESを使用するほとんどのユーザーは通常、技術的には未熟である作業員であるため、UIはシンプルで解りやすいように設計すべきである。そして、アプリケーションは2つのバージョンを有する。1つは一般作業員用、もう1つは管理監督者用である。どちらのバージョンも操作性は基本的に同じであるが、主な違いは、管理監督者用は、製造におけるルーチンの操作だけでなく、ジョブの優先順位の割

り当て、パフォーマンスの表示など、より多くの情報を追加、編集、表示する機能が必要であるということである。

また、数多い中小企業工場へのMES導入は有効であり、その理由は以下の通りである[132]。

多くの中小企業工場は、製造現場情報を手動入力及び手書きベースのデータ収集に依存しており、MESのような製造システムに投資するための予備の資金を持っていない場合が多い。

しかし、IoT対応のスマートMESは工場運営の効率化に貢献できる。まず、モバイル機器を使用することにより、作業者の業務だけでなく、管理監督者の業務も軽減できる。そして、製造現場の製造活動に正確で迅速に対応できるようになる。第2に、分散型クラウドサーバーを使用すると、複数のMESによって提供される情報を1つのデータベースに保存できるようになる。以上の生産効率化は、MES等の製造システム投資に値するものである。

また現在のMESは、本来の製造実行システムの範囲を越えて、生産計画や製造計画、データ解析の領域に発展してきている。今後は、SCMやデータ解析システムとの連携を強化し、本来MESが持つべき機能を明確化し製造システムの効率化を検討するべきである。

#### 4. 2. 3 文献レビューと本研究との関係

SOAを導入するには、従来型の産業システムから次世代のSOAベースの自動化システムへの移行に必要なステップとして、異種デバイスとシステムの階層間相互作用の必要性がある[133]。そして、SOAの機能不足をカバーするためのIEC 61499 ファンクションブロックアーキテクチャの導入がある。これは、制御機器が適切にシステムレベルでのサービス間の連携をするための仕様の標準化及びPLC等のプログラミング言語の共通化である[134]。また、柔軟な工場統合とデータ利用を可能にするように設計されたライン情報システムアーキテクチャ(LISA(Language for Instruction Set Architecture))があるが、これは、疎結合、プロトタイプ指向の情報モデル、及び形式化された変換サービスを備えたイベント駆動型アーキテクチャである[120]。

制御システムについては、インダストリー4.0の概念に対応するためのスマート化について述べられている。これは、PLC、DCSの機能の高度化に関する研究と先端のデバイスとのインターフェース標準化、システム統合に制御システムを組入れるためのネットワークアーキテクチャの導入等である。MESについても、スマート化を効率的に達成するための機能論が提唱されている。

以上、第2章の文献レビューの内容も含めて、多くの既存の研究は概念的な提案であり、プラントシステムのアーキテクチャに関する技術のほとんどはまだ初期段階であり、実証実験と事例研究を通じて検証する必要があることが解った。よってこれらの技術は、実際にスマート化をめざした製造工場に適用できるようにするためには、さらに調査及び改良する必要がある。本研究の新規性と貢献は、定性分析と定量計算の組合せを論じており、食品工場における製造システムの構築のための特定の設計基準を提案していることである。

### 4. 3 提案システムモデル

本章では、ISA-95を参考にして食品製造工場における、実用的な5階層の水平階層型システムモデルを提案する。

第1階層は、設備個別制御階層である。第2階層は、エリア内ネットワーク階層であり、エリア内の各ラインを集約する。第3階層は、プラントを統括する制御サーバー階層である。そして第4階層は、製造管理階層であり、MES、WMSで構成される。図4-3は、提案している水平階層型システムモデルの全体的なフレームワークを示している。

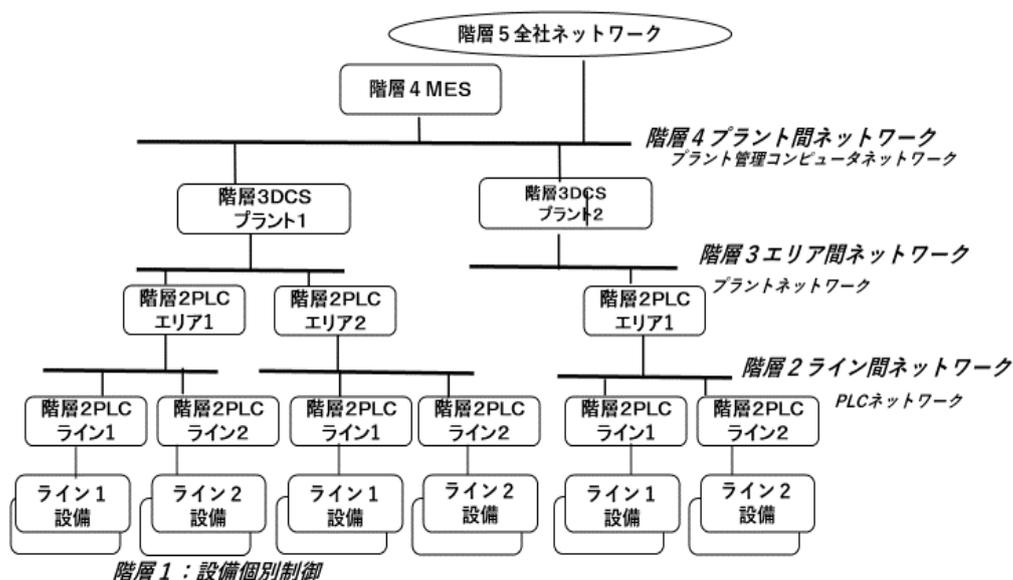


図4-3 水平階層型システムの全体構成とフレームワーク

#### 4. 3. 1 第1階層：個別設備制御階層

この階層は、ラインに設置されている各設備を個別に制御し運転するための階層である。

食品工場に設備を導入する場合、その設備を単体で制御するための計装機器（P L C、アナログ調節器、機器操作パネル等）は、通常、設備メーカーが計装機器を選定し、専門の機器ベンダーから購入する。それは、設備メーカーの設備制御ソフトウェアが設備メーカー独自のオペレーティングシステムと通信プロトコルを使用してその設備の最適な設備制御ロジックを作成するためである。そして、これが各設備メーカーの運転制御ノウハウとなっており、そのロジックはブラックボックス化されていることが多い。そして、設備メーカーは設備ユーザーの要件に応じて納品する設備の制御ロジックをカスタマイズして変更し、独自のU Iを介して操作パラメータを設定及び調整し、設備と制御機器を一体化して各設備ユーザーである食品製造業に販売する。よって、国産設備メーカーであれば、主制御機器であるP L Cのベンダーを指定することが可能な場合があるが、基本的には、設備ユーザーである食品製造業が制御機器を選定することは難しくなっている。

各設備をライン内で連動させて運転する場合は、設備ユーザーと各設備メーカーで連動方法を決定し、各設備にトラブルが発生した場合等に自動で起動停止するためのインターロックを設備間で取り合い、製造ライン全体の運転の正常化を確保できるようにしている。

各設備間の接続は次の3つのケースがある。

##### **(1) 各設備の計装機器が同一メーカーの場合**

各設備は、計装機器メーカーが提供している計装ネットワークを使用して接続する（例、三菱P L Cネットワーク等）。

##### **(2) 各設備により計装機器メーカーが異なる場合（P L C、操作パネル等）**

各計装機器メーカーが、通信ユニットを搭載している、汎用計装ネットワークを使用して接続する（C C - L I N K、F L - N E T等）。

また、近年汎用コンピュータネットワークケーブルである、イーサネットを使用して、インターネットプロトコルである、T C P / I Pプロトコルが使用できる計装機器が多くなってきている。このプロトコルを使用すると、コンピュータネットワークと混在させることができる。そして計装機器から、インターネットへのアクセスも可能となる。さらに、インダストリー4.0の管理シェルのような概念に適合する高度な標準プラットフォームに適用できる計装機器も開発されてきている。

### (3) 計装ネットワークと計装リンクが使用できない場合

海外のPLCや特殊な計装機器が設備に使用されている場合は、計装ネットワークやリンクに接続できない。この場合接続したい信号接点は、計装ネットワークに接続されている他の設備に設置されているPLCのI/Oユニットにハードワイヤー（信号線）で接続する。

図4-4、4-5は、製造工程における前工程と後工程（第3章1節参照のこと）について、第1階層の詳細なシステム構成を示している。

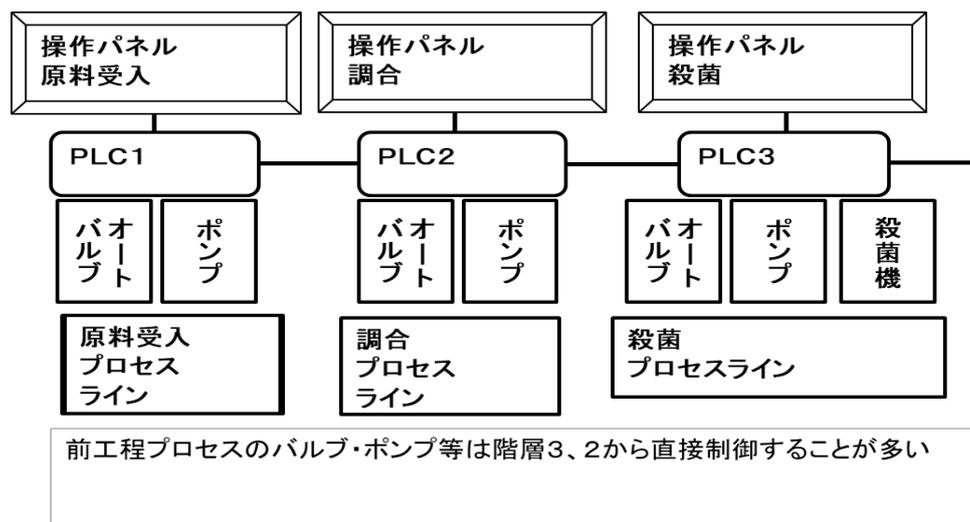


図4-4 第1階層のシステム構成（前工程）

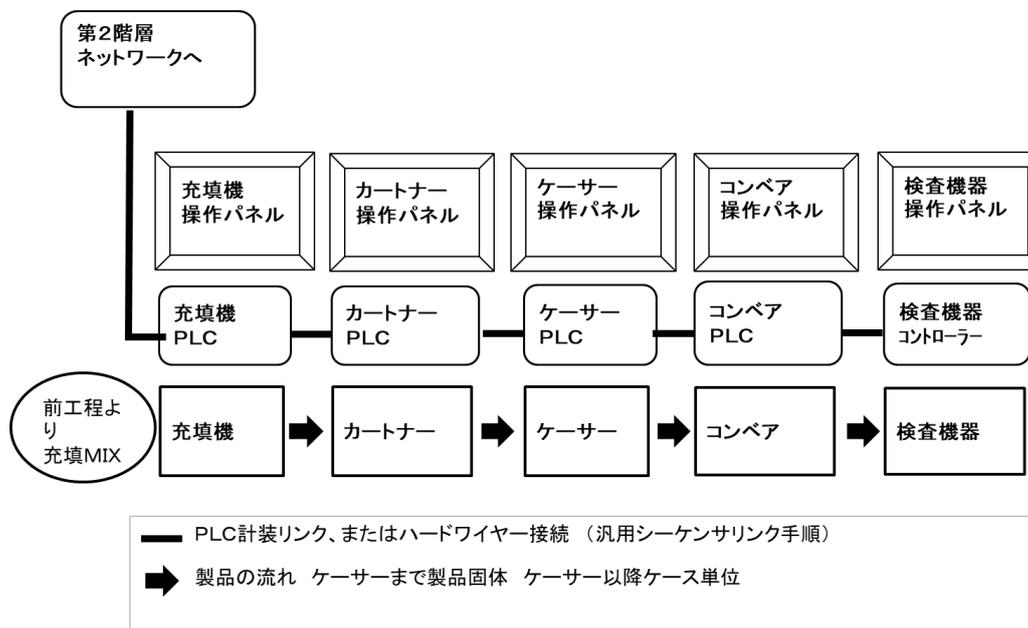


図4-5 第1階層のシステム構成（後工程）

また、第1階層の特徴として、設備ユーザーの工場制御システム系とは別に、各設備メーカーは設備に設置した計装機器を自社のシステムに外部から接続または統合し、設備ユーザーの稼働データ等を取得できることがある。

つまり、設備メーカーはこのデータをモニタリング及び分析することにより、現在設定されている運転パラメータを変更して、設備稼働の安定性と設備保守のサービスレベル（予防及び故障発生時のリアルタイム保守、パーツ寿命の設定など）を向上させることができる。またこれらは、設備メーカーにとって、設備改良へ繋げるデータ解析を実施することができるということでもある。

更に、設備ユーザーから取得したデータを解析し、設備ユーザーの運転調整ノウハウを反映したソフトウェアをモジュール化しインダストリー4.0の基準を満たすインターフェースに適合させると、設備運転ノウハウの横展開が容易になり、新人オペレーター等未熟練者による設備調整が容易になり、トレーニング時間を短縮できる。このことは、他の工場に設備を展開する際に大きな貢献をすることができる。

以上、第1階層はユーザー、設備メーカー共に、IoTデータを取得することが可能な階層である。以上の関連性を図4-6に示す。

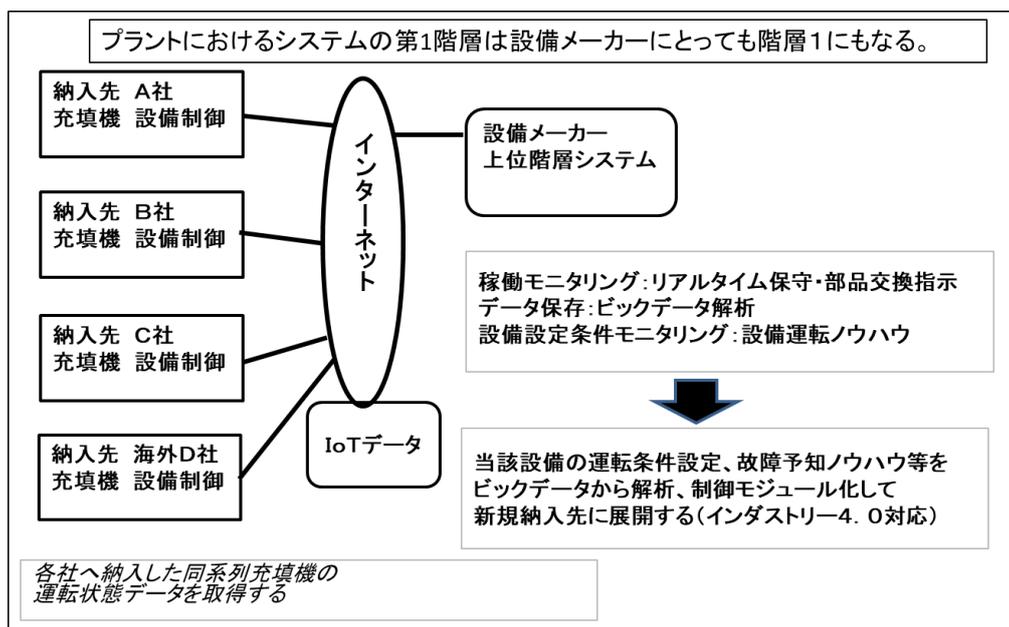


図4-6 第1階層データの設備メーカーへの展開

#### 4. 3. 2 第2階層：エリア内ネットワーク階層（計装ネットワーク）

第2階層は、直接設備を制御するのではなく、下位階層である第1階層の各ラインの計装機器に対して、運転指示や各設備への運転制御パラメータを設定し、ライン運転中は、エリア内の各ラインの稼働状況を統合監視する。また、各ラインの製造実績データ、稼働実績データ、工程検査データ等を集約する。つまり、第1階層が各ラインに設置された設備を個別に制御するのに対して、エリア内の各ラインの設備を連動運転するために、ライン全体を集中制御する階層である。図4-7に第2階層の構成を示す。

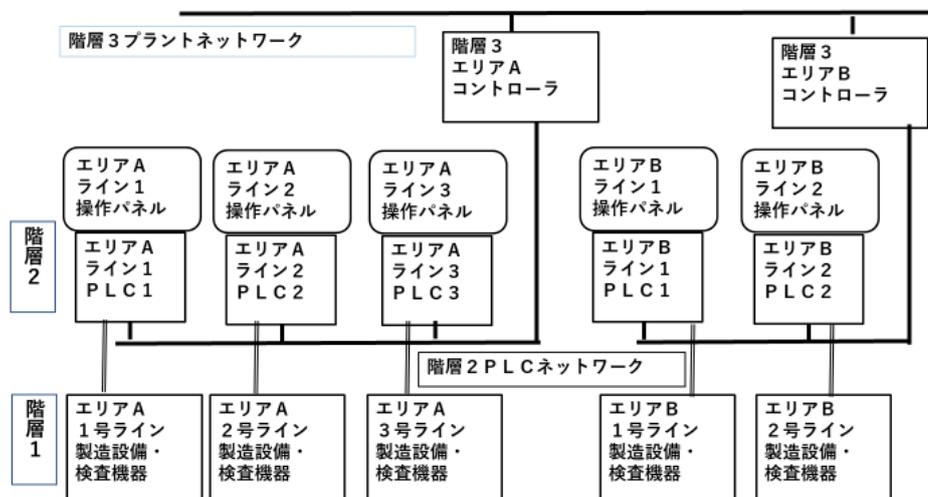


図4-7 第2階層のシステム構成と他階層との関連

ライン全体を集中制御するために、第2階層で使用すべき計装機器は、プラントで統一されたインターフェースとネットワークプロトコルに対応する規格のPLCである。それは、各ラインに1台ずつ設置し、計装ネットワークによりエリア内の各ラインを水平方向に接続する。この階層のネットワークは、上位階層である第3階層とも接続できるものとする。

現在、計装機器のネットワークには、前述のとおり、イーサネットとTCP/IPに対応できるようになってきており、同一ネットワーク内でのコンピュータの混

在もできるため、インダストリー4.0 のシステム統合に向けて汎用性が更に向上している。

さらに、ドイツ企業ベッコフオートメーション (Beckhoff Automation) によって開発された、イーサネットと互換性があり、通信高速性が非常に高いことが特長のオープンな計装ネットワークの一つであるイーサキャット、及び、ドイツのカールスルーエに本部を置く P I (PROFIBUS & PROFINET International) によって規定・管理され、イーサネットのオープン性と柔軟なオプションが可能であるという利点を兼ね備えた産業用イーサネットである P R O F I N E T 等、高度な標準プラットフォームを適用できる計装機器も増加してきている。

以上の計装ネットワークシステムから、どの方式を採用するかは、そのプラント、エリアでの信号点数、情報通信量、必要とするスキャン速度等を考慮して、コストパフォーマンスの最も良い方式を採用すべきである。

次に、ライン内の各設備の計装機器 ( P L C 等 ) との接続は、第 1 階層の接続方法で述べたように、ベンダーが統一されている場合は専用計装ネットワークが使用でき、汎用計装ネットワークを使用するか選択ができる。ネットワークに対応していない計装機器とは、ハードワイヤー ( 信号線 ) で接続する。

そして、各ラインに独立して設置される、アナログ調節器ユニットやセンサーとの直接接続も可能とする。尚、本階層ネットワークの通信スキャン速度は 20msec 程度でリアルタイムに行うことができるものとする。

また、プラントの前工程であるプロセスにおける調合、殺菌、反応系等の主要コンポーネント ( 例、タンク間移送、調合制御、殺菌機制御、反応制御、機器洗浄制御 ) の制御対象は、バルブ制御、流量制御、温度制御、圧力制御等が主となるため、第 1 階層ではなく、第 2 階層または後述する第 3 階層のコントローラーから制御を行うことが多い。

この第 2 階層では、ラインの運転操作のための操作パネルは、主にグラフィックパネルがラインごとに設置され、ライン全体を集約操作するための U I を提供する。

この操作パネルは、第 1 階層では各設備メーカーの仕様で作成され、各設備単体での操作に限定されていることに対して、第 2 階層では、各設備の稼働状態モニタリング ( 異常情報の表示等 ) 、操作 ( 運転データの設定等 ) を総合的に行う機能を持ったプラント内で共通化した仕様の U I 操作パネルとする。

このことにより、プラント内で汎用的な U I が提供され、操作の標準化が実現でき、人的な操作ミスによる誤動作が低減できる。

第 2 階層では、第 1 階層の個別機器の制御ノウハウとは別に、ユーザーは上位階層のデータベースに蓄積することができる各設備の連動制御ノウハウを稼働実績データとして取得でき、製造管理の高度化に貢献できる。

また、各エリア、ラインの計装機器の統一化、ネットワーク方式やU I 機能の標準化は、他のプラントの同様なラインへの横展開が容易であり、システム開発の効率化とメンテナンス効率を向上させる。

#### 4. 3. 3 第3階層：制御サーバー階層

第3階層は、図4-8に示すように、中規模または大規模な工場に導入されることが多いシステム階層である。主として、プラントのコントロールルームで、各プラントを集中的に監視及び制御する制御サーバーシステムの階層であり、各エリアの第2階層のPLCは、エリア間の動作を制御するために第3階層のネットワークに接続される。また多くの場合、前工程プロセス（調合、殺菌、反応系等）は、この階層のコントローラーにより各設備を直接制御する。

この階層のシステム構成には、専用DCSを使用する場合とSCADAシステムとPLCの組合せで構成する場合の2つの方式がある。

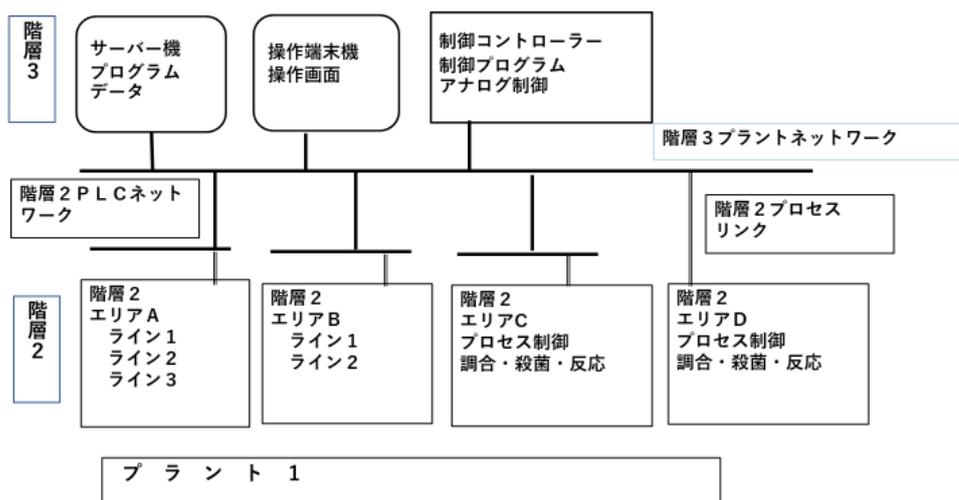


図4-8 第3階層 システム構成

第3階層を構成するシステム機器は次の通りである。

- ① サーバーコンピュータ：プログラミング、画面作成等のエンジニアリング機能等とデータベースによるデータストレージ機能を有するプラントの統合サーバーコンピュータ。
- ② 操作端末：主にコントロールルームで、プラント全体に対してグラフィカルUIを使用して監視・制御するコンピュータ。
- ③ 制御コントローラー：制御プログラムが動作して第2階層のPLC及び、前工程のプロセス制御を行うため、特別に設計された制御専用コンピュータであるが、SCADAシステムとPLCの組合せで構成の場合は、組込まれたPLCがこの機能を果たす。

第3階層におけるネットワーク構成は、多くの場合次の通りである。

- ① 第2階層の各エリアのPLCを接続するための計装ネットワーク。
- ② 第3階層の各システム機器を統合する計装ネットワーク。
- ③ 上位階層や他のプラントの第3階層と接続し、製造管理等の情報処理をするためのネットワーク。

以上のように、この階層では複数のネットワークが混在し、それぞれの機能を振分けている。①、②の計装ネットワークは、第2階層のネットワーク手順で説明したものである。③は汎用的な情報ネットワーク（イーサネット、TCP/IPプロトコル）でネットワークを構成する。

第3階層の主な機能は、プラント及び各エリアの設備を制御するための制御パラメータ設定、ラインの運転指示等である。

また、プラント全体におけるリアルタイムでの監視機能として、各ラインの運転・停止、設備の異常警報出力等の稼働状況と、温度、圧力、流量、モーター周波数等の各設備の設定値に対する実績値のモニタリングがある。

そして、製造実績管理として、各ラインの稼働実績データ、異常警報出力データ等データ蓄積と帳票出力及び上位階層への送信機能を有する。

第3階層のシステム開発ツール（制御プログラム作成、画面作成等）はパッケージ化されたソフトウェアが提供されており、これらを使用して、制御プログラムと画面作成を行うことができる。そして、作成したソフトウェアを標準化すると、他のプラントや他の工場への水平展開ができる。このことは、リスク管理のために同様な複数の工場を持つ場合や、生産補完機能として他の工場を持つことにとって重要な機能である。

また、プラント設計や運転制御のノウハウを蓄積し、ハードウェア（製造設備）とソフトウェア（運転制御）を統合して、製造受託サービスの拡大にも貢献でき、生産機能の拡張が容易にできるようになる。

#### 4. 3. 4 第4階層：製造管理階層（MES、WMS）

第4階層は、工場全体と物流を全体的に管理する製造システムの最上位の階層となり、第5階層の全社ネットワークに接続される。図4-9に第4階層のシステム構成を示す。

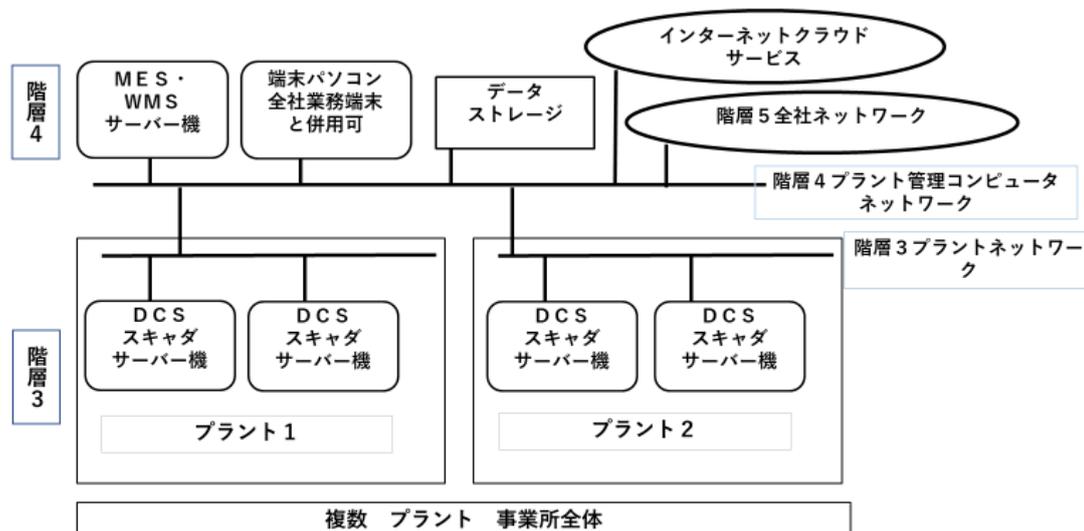


図4-9 第4階層システム構成

この階層を構成している、製造を統合するMESと物流を統合するWMS（Warehouse Management System）は、システムベンダーが提供する基本的な統合システムである。実際の工場での適用は、システムベンダーが提供している基本ソフトウェアの標準的のテンプレートだけでは、各ユーザーが管理する各オブジェクトの管理標準、製造標準、作業標準等に完全に適合させることは難しく、各テンプレートをカスタマイズすることにより、プラントに適合したシステムを作成する。これは、各システムユーザーのテンプレートとして標準化することにより横展開が可能となる。

この階層を構成するネットワークは、基本的に汎用コンピュータネットワークのイーサネット、TCP/IPを使用し、第5階層の全社ネットワークと接続し、会社全体のビジネスフローと同期が取れるように構築する。さらに、この階層のネットワークとシステムは、クラウド対応が可能である。

MESとWMSは異なるオブジェクトを個別に管理する。

## (1) M E S の管理オブジェクト

- ① 製造管理：製造計画作成、原材料配合計画作成、製造進捗管理、製造実績編集管理、製造トレーサビリティ管理（データ取得、編集、保存、検索）。
- ② 資材管理：資材在庫管理、使用計画作成、納入計画作成、使用実績管理、資材トレーサビリティ管理（データ取得、編集、保存、検索）。
- ③ 品質管理：検査サンプル取得計画作成、検査項目管理、検査指示作成、検査結果管理、検査判定処理、検査トレーサビリティ管理（データ取得、編集、保存、検索）。
- ④ 作業員への作業指図：作業計画作成、作業指図書作成、作業員への作業方法指示、作業実績管理、作業トレーサビリティ管理（データ取得、編集、保存、検索）。

## (2) W M S の管理オブジェクト

- ① 入出庫管理：入庫計画作成、出庫計画作成、入庫指示、出庫指示、伝票データ処理、入出庫トレーサビリティ管理（データ取得、編集、保存、検索）。
- ② 在庫管理：在庫ロケーション管理、在庫受払管理。
- ③ 設備稼働指示：倉庫設備の自動運転管理、設備稼働トレーサビリティ管理（データ取得、編集、保存、検索）。
- ④ 設備管理：設備運用管理、保守管理。
- ⑤ 作業員への作業指図：作業計画作成、作業指図書作成、作業員への作業方法指示、作業実績管理、作業トレーサビリティ管理（データ取得、編集、保存、検索）。

以上の各オブジェクトを管理するシステムの機能には、以下のようなものがある。統合され同期化された全社ネットワークからの生産計画の取得、各プラントへの詳細製造計画の作成、下位階層への計画データと各パラメータの設定指示、作業員への作業指示の作成、設備稼働と作業の実行管理、計画と指示に対する実績データの取得、各オブジェクトを統合するデータベースの構築、品質管理業務管理等であり、各システムの機能に対する帳票作成機能が含まれる。

以上の管理は、全社ネットワークとの連携により、月次、日次、ロット別に必要都度行うことができる。

さらに、トレーサビリティの確保をするために、設備稼働、資材の納品と使用実績、品質管理業務での製品検査と工程検査実績、作業員の作業実績のトレーサビリティデータの取得と編集機能により、各オブジェクトで発生するデータを統合的なデータベースに保存する。そして、M E S と W M S のトレーサビリティデータを連携させることにより、製品及び原材料のフォワードとバックワード両方の検索機能

を持つことができる。このことは、食品の安心・安全にとって不可欠であり、この階層でシステム化することにより、迅速な対応が可能になる。

統合化されたデータベースのデータは、ビッグデータとして、I o Tデータ分析（故障予知、物性管理等）、A Iエンジンのバックボーン分析、品質管理データ分析等に活用する。このことにより、工場における製造管理、製造方案、設備保守、品質管理の管理機能の向上ができ、A Iコントロールが有効な製造工程では自動化のレベルを向上させることができる。

そして、工場・物流センター間のデータ共有は、データベースをクラウド化することで容易に可能になる。

更に、第4階層では、MTである製造管理等のノウハウのロジックがデータベース化されるために、他工場や他社の工場への技術移転が可能となり、将来の工場運用や新工場建設、プラントラインの増設、工程改善にこのノウハウを使用することにより、会社全体の技術力向上に大きく貢献することができる。

#### 4. 3. 5 第5階層：全社ネットワーク階層

第5階層は、全社ネットワークであり、各事業所の業務管理を行い、基幹系システム、E R P、S C M等と接続する。この階層のネットワークでは、財務、人事、注文、メールサービス、イントラネット等を網羅し、会社の全部門をカバーしている、経営資源を統括するシステムである。

ネットワークの方式は、I P - V P N (Internet Protocol Virtual Private Network) が多くの企業で採用されている。また、外部の企業である、サプライヤーや物流業者のネットワークとも、I P - V P Nを介して接続できる。近年クラウドコンピューティング技術が急速に発展し、第4階層のシステムも含めて、クラウドサービスを容易に利用することが可能になっている。ただし、クラウドサービスでシステムを構成する場合は、サイバー攻撃に対するリスク対策を充分考慮する必要がある。

## 4. 4 提案システムモデルの機能評価

### 4. 4. 1 各階層のUIと操作機能及び見える化機能

第1階層のUIは、多くの場合、設備メーカーが各設備に特定の仕様に準拠して作成しており、その仕様はユーザーに公開されていない場合がある。そのため、ライン内の各設備のUIである画面仕様は統一化できないことが多い（色、スイッチ配置等）。通常は、単独運転を実施する手動モードと、第2階層からの運転指示により他の設備と連動運転をする自動モードがある。そして、設備メーカーが設備をメンテナンスするためのツール画面を有していることが多いが、この画面は設備の動作保証に係わるパラメータ変更等を行う機能があるため、ユーザーに開放しない場合もある。

第2階層のUIは、主に自動モードでラインの各設備を運転する時に使用される。そのため通常は、各ラインにグラフィックパネルを1セット設置する。

これは生産ライン全体を管理し、必要に応じて各設備の制御パラメータの設定ができ、ラインの起動・停止、各設備への品種設定値等をリアルタイムに操作できる。

また、ラインのモニタリング機能として、異常警報出力や各設備の動作状態の確認、検査機器の計測値による製品品質の確認等の監視機能を備えており、ライン全体の見える化を可能にする機能を有している。さらに、エリア内の他のラインの状態も同様にモニタリングして、ライン間の稼働を調整する機能を持つこともエリア全体を管理する上で重要である。

そして、UI画面配色の標準化（操作画面、モニタリング画面、警報出力等）と、画面上の配置の標準化（操作スイッチ、警報出力、稼働データ等）をすることにより、ヒューマンエラーの減少と作業者の教育時間を短縮することができる。

第3階層では、パッケージ化されたDCS及びSCADAシステムが使用されているため、システムベンダーが提供するGUI（Graphical User Interface）でプラント固有のUIを構築する。

UIでの操作機能として、前工程では、プロセス全体の運転管理と各機器（オートバルブ、ポンプ等）個別の起動・停止画面を持つ。後工程では、運転許可の設定、MIXの流下設定と、流下工程を連動制御するための画面を持ち、プラント全体の見える化ができるようにする。この階層の画面配色と配置は第2階層のルールと共通化させることにより、プラント全体のUIの標準化ができる。

製造管理機能としては、データベースを構築し品種ごとに各設備の運転パラメータ等の製造マスターデータの作成、製造バッチごとの品種設定機能を持たせる。そ

して、稼働状態データのグラフ化、過去データの参照、警報データの集約等、製造モニタリングデータもデータベース構築することにより、メンテナンスが効率的及び適確に行える。

更に、エンジニアリングツールとしては、制御コントローラーとPLC及び第2階層のPLCのプログラミング画面、各アナログ調節器のプログラミング画面をシステムに実装し、プラント全体の制御プログラム及び製造実績管理プログラムを管理する。

第4階層のUIは、製造管理のためのものであり採用したシステムの作成ツールで作成する。多くの場合、直接プラントを制御することはなく、原材料の計量や配合などの作業員による作業管理（作業指示、作業進捗、実績収集等）の画面、品質管理の検査指示と実績入力、原材料・資材の受入管理、原材料・資材の使用計画管理と使用実績管理、製造計画作成、製造実績管理、トレーサビリティデータ分析等、現在の製造運転と直接同期していない作業の管理はこの階層のMESで作成する。さらに、製造管理全般の情報処理をする画面と、帳票作成機能を持つ。

また、データベース化された製造実績データ、設備稼働実績データの解析による設備診断機能や、原材料・資材管理データ、作業員管理データ等、生産管理機能のUIを構築すると、他のプラントへの横展開や、プラント自体のブラッシュアップに有効である。全社ネットワークとはこの階層で接続するため、SCMとの連携による生産計画編集、基幹システムへの実績データ送信処理等の外部システムとの連携のためのUIはこの階層で作成する。

現在の無線技術では、各階層のUIにモバイル端末を使用することも可能である。これは、作業員が持運び操作することができるため、作業員の作業、設備のメンテナンス、ライン設備のモニタリングに使用することは有効である。しかし、モバイル端末が製造工程や設備に固定されていないため、設備制御に使用する場合は、本来ラインや設備を目視しなければならない操作を遠隔で行うことができってしまうことから、設備運転の安全上非常に大きな問題である。この問題を回避するために、モバイル端末での操作では安全性を確保するために、ネットワークへの接続制御と操作のインターロック制御が必要となる。

以上のように、システムの各機能（リアルタイムモニタリング、運転指示、リアルタイムのデータ処理、遠隔監視、オフライン作業処理、外部システム連携等）を、どの階層のUIで行うか標準化することにより、効率的な製造システムの構築と他工場、他社への展開、プラントの製造工程変更・増設時の対応等が容易にできる。

各階層での見える化のレベルは次のようになる。

- ・ 第1階層：設備単体の状態、稼働。
- ・ 第2階層：ライン、プロセスのリアルタイム稼働状態、エリア内各設備のリアルタイム稼働状態。
- ・ 第3階層：前工程プロセスリアルタイム稼働状態、データベース化されたモニタリングデータの過去トレンド。
- ・ 第4階層：製造計画、製造実績、作業、設備稼働の製造管理集約データ、トレーサビリティデータ、原材料・資材・製品のロットデータ、品質検査データ

#### 4. 4. 2 蓄積されるノウハウ

乳製品工場における製造管理のノウハウは、主に以下のようなものが蓄積されている。これらのノウハウはOTやMTの向上に反映され、IT活用によるシステムモジュール化することで、製造効率化に貢献する。

##### ① 設備の運転管理

機器操作制御（多くの場合、機器ベンダーに帰属されている）。

##### ② 製造方案

製造ラインの運転管理（UI設計含む）、製造工程制御ロジック（UI設計含む）、製品物性コントロール方法、工程管理検査方法、設備洗浄方法、品質検査方法（UI設計含む）。

##### ③ 衛生管理対策

微生物汚染対策、異物混入防止対策。

##### ④ 安定稼働・保守

設備の日常点検方法、定期保全方法（共にUI設計を含む）。

##### ⑤ 製造管理

トレーサビリティデータ構築、原材料・資材管理、製造実績管理（稼働率、歩留り、日報、月報管理）、設備運転データ分析方法。

以上のノウハウは、各階層のシステムに織り込まれている。そして、モジュール化されたソフトウェアとしてシステムに蓄積され、工場が稼働と共に改良されていく。これらのノウハウのシステムモジュールは、水平展開をして技術移転と技術の向上に大きく貢献するものである。

第1階層では、個々の設備の運転制御ノウハウ（運転条件、パラメータ調整、パーツ管理等）が自動的かつ体系的に蓄積される。設備メーカーにとってこのノウハウは、設備の改良と新設備の設計に貢献するものである。また、故障データから予防保全のノウハウが蓄積される。設備メーカーとユーザーでこのノウハウを共有すると様々な運転条件でのノウハウが蓄積され精度が向上する。

第2階層、第3階層では、プラントの製造方案のノウハウが蓄積される。このノウハウは、製造工程を自動化、システム化する場合に、制御プログラムロジックや標準UIとして、ユーザー及び制御プログラムを作成するシステムベンダーに蓄積され、このノウハウを活用できる。そしてこのノウハウをプロセス、ラインでモジュール化することで、各工場プロセスで製造方案を標準化することができる。

第4階層では、工場を運営するための製造管理、品質管理、トレーサビリティデータ構築と検索等のノウハウが蓄積される。そのため、高度な設備稼働を可能とするためのデータ解析ノウハウは、この階層でシステム化する。

#### 4. 4. 3 トレーサビリティの確保

トレーサビリティデータの確保は、食品業界にとって重要な課題である。食品工場のトレーサビリティデータには、主に以下のデータで構成されている。

##### ① 製品固有のデータ

製品固有のロット番号、各製造工程における製造時刻、オンライン検査データ（重量値、容量値、異物検査結果等）

##### ② 設備状態データ

各設備へのパラメータ設定値、稼働状態実績値（温度、圧力、速度、等）

##### ③ 使用設備データ

前工程プロセスで各バッチに使用したタンク番号、配管ライン、調合設備、殺菌機等、及び後工程で製品ロットごとに使用した各設備

##### ④ 品質検査データ

前工程の製造バッチと製品ロットごとのサンプル検査データ

##### ⑤ 原材料、資材データ

前工程で使用した原材料、副原料、後工程で使用した資材のロットデータ

##### ⑥ オペレーターデータ

各エリア、ライン製造時の監督者と製造オペレーターを特定するデータ

##### ⑦ 製造環境データ

製造時の各エリアの空気清浄度、換気、室温、湿度等の製造室の環境データ

以上のデータは、各階層に設定した取得タイミングとデータ粒度で取得、集約されて、第4階層のデータベースに蓄積する。システムの検索機能により、バックワードデータ検索として、特定の製品における原材料、資材、設備状態、オペレーター、製造環境を特定できる。また、フォワードデータ検索として、使用した原材料、資材、特定の時刻の設備状態及び担当した製造オペレーターから製品を特定することができる。

取得するデータ粒度は、第1階層、第2階層ではリアルタイムの製品固体単位とする。第3階層では製造バッチ単位と製品ロット単位に使用設備データを付加してプラントごとにデータを集約する。第4階層では、品質検査、製造オペレーター、原材料、資材、製造環境等のデータをさらに付加して、統合トレーサビリティデータベースとする。

#### 4. 4. 4 ロボット管理制御

食品プラントでも急速に導入が推進されている、様々な機能を持つロボットは、製造システムの各階層で用途に合致した方法で管理制御する。ロボットライン構築には、ロボットシステムエンジニアリングのスキルが必要である。

##### (1) 単純作業の代替ロボット

単純な繰返し作業を作業員に代替して行うためには、パラレルロボットやスカラールロボットなどのロボットを導入し、箱詰め作業、製品の整列、コンベアへの移送等、単純で反復的な人間の作業を実行する。製造設備と同様にそれらは第1階層に配置され、ロボットメーカーがパラメータ調整をして制御する。そして、第2階層のライン制御プログラムによって他の設備と連動させる。

##### (2) 多機能・複合型ロボット

ラインの複数設備の機能を自動化するためには、アーム型ロボットや双腕型ロボットなどの多機能ロボットを導入する。第1階層でロボットメーカーによりロボット自体のパラメータ設定と制御をする。そして、第2階層及び第3階層では複合制御のロジックを作成しセンサーとの組み合わせでロボットの動作パターンを設定することにより、与えられた動作指示に応じた動作ができるため、複合的な製造ラインの運転を行うことができる。例えば、1つのラインで複数の形態のダンボールケースの製品を製造する場合、機構設備では複数台数の設置が必要になるが、この多機能ロボットでは1台で対応が可能となる。

対応する作業例としては、製函、重量検査、外観検査、不良品排除、箱詰め作業、封函、コンベア移送までの作業を、1セットのロボットシステムで各作業を組合せ実施すること及び各製品品種に対応した、充填機や包装機への資材供給等がある。

### (3) 人間共存型ロボット

人間共存型ロボットは、計画の指示を受けて人間と同等の作業を実施でき、更に人間と協同作業を実施できる。そして、そのほとんどが自動歩行機能を備えている。多機能ロボットと同様に第1階層で運転制御を行う。そして、第3階層、第4階層で計画指示の作成とロボットへの設定を行い、第4階層で行う作業員への作業指示、実績管理と同様にロボットを管理する。

対応する作業例としては、原材料移動～秤量～ロット情報取得～調合投入という一連の作業を作業員と協同で実施すること、検査作業員と協同の品質検査等がある。

## 4. 4. 5 各階層のデータレベルとOT・IT、MT・ITの対応

第1階層は個別設備の制御信号が管理され信号点数は最も多い。そして、第2階層で各製造ラインに集約した制御信号点数となる。また、標準仕様の設備にデバイスやセンサーを追加する際は、設備メーカーに対してプラントでの統一仕様に基づいた要件を提示することにより、各設備からのデータ取得や制御信号の標準化が容易となる。前工程のプロセスでは、第1階層の制御信号を集約したものを直接第3階層に転送することが多い。そして、第2階層から第3階層に上がるところで制御信号がデータ化されていく。このデータが第3階層から第4階層に上がり、更に製造管理系のデータが付加されて、製造システムの統合データベースを構築する。

以上のような各階層でのデータ管理のスパン（計画・実績等の保存期間）、メッシュ（日単位、バッチ単位、時刻単位）、タイミング（リアルタイム、発生都度）をルール化することで、設備運転、データ集約、データストレージ、データ解析を行うためのデータの流れの統一化が階層ごとに行えるようになる。

第1階層から第3階層では、フィジカル空間でのOTの自動化とデータ管理をシステム化しており、OTの効率化を達成し、製造技術のノウハウが蓄積される。そして第2階層、第3階層では制御信号をシステムデータに変換して管理する機能があり、第3階層でOTとIT、MTとITを統合している。第4階層、第5階層では、ITによりMTである製造管理、品質管理、生産管理、物流管理等の製造管理技術のノウハウが蓄積され、クラウドサービス等サイバー空間の利用も可能である。

以上のようなことから、ITは各階層でのOTとMTを高度化、高速化するためのツール及びアーキテクチャであり、実際の工場運用のスマート化は、OTとMTを最適なITを導入したシステム化を構築することにより推進されるものである。

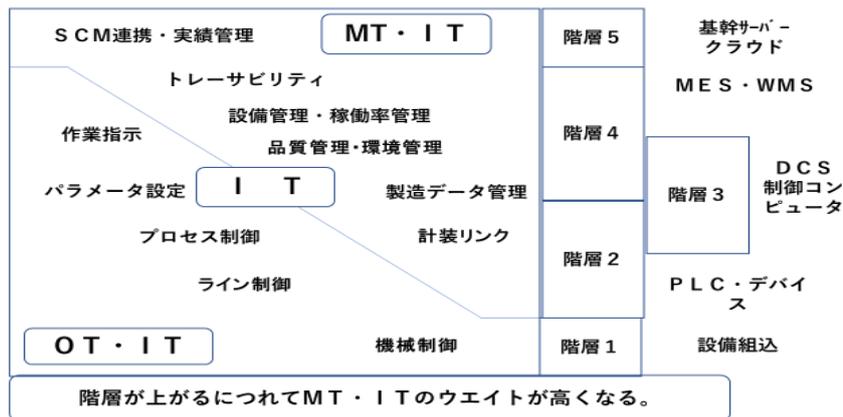


図4-10 各階層でのOT・ITとMT・IT関連図

#### 4. 4. 6 サイバーとフィジカルの階層別区分

水平階層型システムでは、オペレーション、コントロール、マネジメントの各管理レベルを垂直方向に明確化することができる。このことは、製造システム全体において、サイバーシステムの利用とフィジカルシステム作成の区分を共通化し標準化できるということである。

例えば、階層2のPLC制御レベルでは、設備制御を直接実施するため、現在のネットワークリスク及びシステムメンテナンス、異常対応を考えるとフィジカルシステムが良い。これは、階層2のレベルは、プラント間、他場所との共通ロジックが少なく、UI仕様等のシステム仕様の共通化を実施すれば、システムロジックは、個別最適化が多いことにも起因する。

階層3のDCS、SCADAレベルは、プロセスを直接制御するレベルは階層2と同様に、フィジカルにコントローラーを設置する。そして、製造とリアルタイムに同期する必要がない、制御データの設定、製造管理、実績データ管理等はサイバーにアプリケーションとデータベースを構築し、複数場所での共通モジュール化による共有使用、データの共有化、運転状況の確認が可能である。

階層4では、MT機能をサイバーシステムにおいて、複数プラント、他業種のプラントとの共通モジュールによる製造管理、共通データベースの構築をすると、ビッグデータ解析やAIエンジンの構築等が、効率的に達成できる。また、サプライチェーンをつなぐデータ連携、共通モジュールでの業務遂行等、大きな効果を得ることができる。

以上のことは、OTとMTをしっかりと区分して、OTは基本的にフィジカルシステムで構築し、MTはサイバーを最大限活用することが有利であることを示してい

る。そして、この区分でのシステム構築は、現状の技術とサービスで対応可能である。

将来的には、ネットワーク技術のさらなる強化、クラウドサービスの発展により、O Tに係わるシステムもサイバー化が進んでいくことが想定される。このことは、サイバーシステムにて複数拠点の統合管理が可能になるということである。更に、サプライチェーン上の各事業者が、共通システムモジュールの利用による標準化で連携されていくことも想定される。サイバーシステムに参加する事業者が増加すると、各システムモジュールはブラッシュアップされていき、その中により多くのプラント管理ノウハウ、サプライチェーン効率化のノウハウが蓄積され、サイバー空間に同様の機能モジュールが複数構築され提供できるようになる。そして、システムベンダー及びプラントユーザーは、サイバー空間からモジュールを選択して利用できるようになり、標準化されたシステムモジュールで各階層を構成することにより、最適システムを構築できるようになる。

#### 4. 4. 7 全体の評価

水平階層型システムモデルにはその機能面において以下のようなメリットがある。

- ① 階層ごとの機能役割（U I、制御ロジック、データ管理）をルール化し、O TとI Tを合理的に統合させることによって、システム資源（センサー、端末デバイス、計装機器（P L C等）、制御コンピュータ、サーバーコンピュータ、基本ソフトウェア、ネットワーク等）を効果的に構成することができ、全体システムの最適化に貢献する。
- ② システムの負荷を、各階層に適切に分散させることにより、全体のバランスがとれたシステムを構築できる。
- ③ 各階層のネットワーク方式、インターフェース共通化、制御ロジック記述方式のルール化を標準化することで、他のエリア、他のプラントへの横展開を容易にし、システムのマージナルコストが削減できる。
- ④ エリア、プラントを垂直方向ではなく、水平方向に区分しているため、システム開発ベンダーを階層ごとに選定できる。そのため、開発効率の向上と開発コストの削減を達成できる。
- ⑤ 階層ごとにシステムのセキュリティを設定でき、セキュリティ管理の単純化と強化ができる。また、各階層に非常時の役割を設定することで、B C P (Business Continuity Planning)対策がより強化できる。

## 4. 5 水平階層型システムの優位性の検証

本節では、大手乳業会社の工場の事例を基にして、提案した水平階層型システムモデルにおけるシステム構築及び運用についての優位性を垂直型システムとの費用比較を行い検証する。

製造ラインを新設する場合、製品改良に伴い製造ラインを変更する場合や製品を増産するために製造設備を増設する場合（エリア増設、ライン増設）には、製造方案を作成して、その製造方案を基に作業条件、設備条件、製造システム条件、品質検査条件等、新設や増設する設備前提条件を作成する。この前提条件に従って、設備費用積算（システムも含む）、要員配置と作業方法、建設スケジュールを作成し投資をする予算を決定する。この後、設計、建築工事、設備工事、製造試運転、営業運転の日程を組む。

更に、多くの古い設備が他の工場から移設されることもあり、製品の供給を止めずに設備の移設を実施し、営業運転までの日程計画を設定し計画どおりに施工することは、工場操業の切替における重要な問題である。

### 4. 5. 1 システム構成の作成費用

垂直型システムでは、案件都度事業計画に従い、製造方案に基づいた設備配置や適合する制御システム構成を基本設計から作成することが多い。

水平階層型システムの場合は、設備配置、ライン運転方法、調合作業方法、検査方法等をモジュール化、デジタル化することにより、設備構成及びシステム構成を迅速に定型化、統合できるため費用積算が短期間で容易にできる。

更に、設備構成、システム構成を製造方案側にフィードバックして、再検討及び最適化していくことが容易である。

以上より、水平階層型システムでは、設備構成やシステム構成の作成費用を大きく抑制することができる。

### 4. 5. 2 制御方案設計費用

製造設備と製造システムの構成を決定した後、製造制御方法の基本設計を行う。

垂直型システムでは、建設されるエリア、ラインに対しての最適なシステム構成が採択されることになるが、既存のソフトウェア資源があまり使用できない。そのため、システム全体に対して製造制御方法を新規に設計しなければならない。

水平階層型システム場合は、制御方法をモジュールとして設計して、設備構成や作業方法等、既存のシステムや製造プロセスに適合させることができる。特に、第3階層と第4階層のソフトウェア設計では、垂直型では、各階層の機能設計からプログラム設計が必要となるが、水平階層型の場合、ほとんどプログラム設計をする必要がなく、パラメータ調整の設計のみで対応可能である。このため、新設のエリア、ラインは既存のエリア、ラインに準拠し、標準化された設計方針で設計できる。よって、水平階層型システムを構築しておくこと、後述の作業教育、メンテナンスと共に効率的で継続性のある設計ができる。

従って、モジュール化されている水平階層型システムでは、制御方案設計の費用は、垂直型に対して70%程度である。

#### 4. 5. 3 基本ソフトウェア費用

基本ソフトウェア費用は、第3階層のDCS、SCADA、第4階層のMESで発生する。具体的には主に、OS、データベース、パッケージソフトウェア購入費用である。

垂直型システムでは、新設や増設の都度、新規にサーバーコンピュータを導入する必要があり、ほぼすべての場合に、初期投資費用が必要となる。水平階層型システムの場合は、第3階層、第4階層ともに既存のコンピュータリソース（プログラム容量、データストレージ容量、入出力点数等）に余裕があれば基本ソフトウェアへの追加費用は発生しない。今回の事例でも費用は発生していない。

#### 4. 5. 4 新設ハードウェア費用

製造工程の、新設及び増設に伴うシステムハードウェア費用は、第2階層から第4階層で発生する。潜在的な市場規模の拡大や市場シェアの拡大がなければ、企業は製造工程の増設や新しいシステムハードウェアに投資する必要はない。そして、既存のシステムハードウェアは、新製品の生産にも対応できるようにするために、システムの共有容量が必要となる。そして、各製品に対応したシステムの切替機能を十分に活用する必要がある。

垂直型システムでは、異なるシステム構成間でシステム機器やリソースを共有することが難しく、システムハードウェア導入のコストが全ての階層で発生する。

水平型システムの場合は、主に第2階層の製造ラインのPLCの新設で発生するが、既設PLCで新設、増設ラインの対応が可能な場合は、新たなPLCの導入が不要となる。更に、第3階層ではサーバー機の増設は通常必要なく、新設、増設された製造工程での製造方法の拡大と柔軟性に対応するための、制御コントローラーの増設のみが必要となる。また、UI機能である操作端末機は、製造方案が既存と同様であれば増設が不要である場合が多い。第4階層では、基本的にはハードウェアの増設は、新しいエリアを増設する場合に操作端末機の増設が必要であるが、その他は必要ない。

従って、水平階層型システムの新設ハードウェアの費用積算は、垂直型システムのハードウェア費用の約50%程度である。

#### 4. 5. 5 システムインフラとネットワーク費用

システムインフラ費用としては、ネットワーク配線（第2階層、第3階層、第4階層）、ネットワークの設定（第2階層、第3階層、第4階層）、基本ソフトウェアのセットアップ（第3階層、第4階層）、データベース設計と構築（第4階層）、設備信号のPLCへの割付設計（第1階層、第2階層）、新設備との接続配線、PLCのプログラム設定（第1階層、第2階層）等が発生する。

垂直型システムでは、上記のほぼ全てに作業費用が発生する。水平型階層システムの場合は、新規に追加されたネットワーク配線、ネットワーク設定、設備信号のPLCへの割付設計、新設備接続配線、プログラム設定に関して作業費用は発生するが、その他は既存の設定及びデータベースで対応できるため作業費用が発生しない。

従って、システムインフラにかかる費用積算は、水平型システムでは垂直型システムの約30%程度である。

#### 4. 5. 6 制御プログラム作成費用

製造設備を新設及び増設する場合、垂直型システムでは、制御プログラムの作成が必要になるが、水平階層型システムでは、既存の制御プログラムを拡張（制御信

号の拡張、データ共有の拡張等)して対応できることが多く、新たなプログラム作成が不要となる場合が多い。

また、エリアを新設する場合、垂直型システムでは、新たに選定したシステムで制御設計された制御方法に対するプログラムの作成が必要であるが、水平階層型システムの場合は、基本設計段階で標準化を考慮しているため、既存エリアのプログラムを移植転用(マージナル)して対応することができる。そして、第4階層の製造管理のプログラムは、垂直型システムでは新規に導入するシステムの基本ソフトウェアでプログラム作成が必要となるが、水平階層型システムの場合は、マスターデータやパラメータ設定の追加で対応できることが多く、その場合プログラム作成は不要である。

実際には、垂直型、水平階層型の両システムともにプログラム作成工数は発生するが、水平階層型システムの方が、対応が安易かつ容易でありプログラム作成単価も低減できる。よって、大規模な案件であっても、水平階層型システムの費用は垂直型システムの約80%程度である。

#### 4. 5. 7 教育費用

垂直型システムでは、新規にシステムを構築する場合、エンジニアリングツール(プログラム作成ツール)の教育、システム操作教育、システム保守の教育をシステムベンダーから受ける必要がある。また、設備稼働後のオペレーター操作教育も新規システムのUIによる操作教育が必要である。

水平階層型システムの場合は、既存システムを拡張しているため、システム操作、システム保守に対する教育は通常発生しない。また、設備稼働後の操作オペレーター教育も、標準化された共通仕様のUIを展開できるため、設備操作の教育はほぼ必要ない。

従って、垂直型システムでは、エンジニアリングツールとシステム運用の教育費用(システムベンダーの委託費用)が必要となる。一方、水平階層型システムの場合は、これら全ての教育をOJT(on the job training)で実施できる。そのため、システム教育にかかる費用と時間は社内費用となり、垂直型システムよりはるかに低くなる。

#### 4. 5. 8 システム保守費用

ソフトウェアの保守については、既存プログラムのコピー、マスターデータの追加、パラメータ設定で設備の新設、増設に対応した場合増分費用は発生しない。

PLC、操作端末等ハードウェアを増設した場合は、機器の増設分だけ保守費用が増加する。垂直型システムで構築した場合は、新規に導入した全てのハードウェア（サーバー機、操作端末機、計装機器）と基本ソフトウェア（オペレーションシステム、パッケージソフトウェア等）に対して保守費用が新たに発生する。

水平階層型システムの場合は、既設の基本ソフトウェア、サーバー機等を使用できるため、増設したシステム部分の保守費用のみ増加する。水平階層型システムの費用は垂直型システムの約50%程度である。

#### 4. 5. 9 システム更新の数値検証

水平階層型システムを評価するために、ヨーグルトとデザート製造工場における製造システムの更新事例について、発生した費用と作業工数を数値検証する。

システムの対象となる設備規模は次の通りで、食品工場としては大規模である。

- ・ 制御する設備、機器の台数 923台
- ・ デジタル制御信号点数 3000点
- ・ アナログ制御点数 350点

表4-1に数値比較をした内容を示す。そして、表4-2に水平階層型システムと垂直型システムのシステム更新費用と作業工数の数値比較表を示す。

表4-1 数値比較内容

	水平階層型	垂直型
システム構成作成	既存システム構成の確認	既存システム構成とソフトウェア構成の調査工数
基本設計	バックアップ方式設計、プログラム移行方式設計	プログラム仕様設計、制御機能設計、画面仕様書、帳票仕様書
プログラム設計製作	DCS新システムプログラム作成(新システムに更新のためプログラム移行と作成が必要) シーケンスプログラム移行(制御プログラム移行) ドキュメント作成	シーケンス制御プログラム設計製作 画面プログラム設計製作 データ処理バッチプログラム設計製作 アナログ制御プログラム設計製作 ドキュメント作成
新設ハード費用	DCSシステム機器一式、PLC機器一式	DCSシステム機器一式、PLC機器一式
基本ソフト費用	既存システムから新バージョンに更新(DCSパッケージ、制御エンジン、生産管理パッケージ)	DCS/パッケージ、制御エンジン、生産管理パッケージ
システム環境構築費用	サーバー環境設定、端末機環境設定、DB設定、既存データ移行	サーバー環境設定、端末機環境設定、DB設定、既存データ移行
テスト費用	現地切替試験6回実施	社内試験、現地切替試験12回実施
システム保守費用	ハードウェア保守、運用監視保守	ハードウェア保守、運用監視保守

表4-2 システム更新費用と作業工数の数値比較

制御規模と開発工数	機器点数	制御点数 デジタル	制御点数 アナログ	システム構成作成工数	基本設計 工数	制御プログラム作成 工数	開発工数 合計
水平階層型	923	3000	350	0	13	253	266
垂直型	923	3000	350	30	54	370	454
水平/垂直				0.00	0.24	0.68	0.59
システム更新 費用	新設ハード 費用	基本ソフト 費用	システム環境構築 費用	テスト 費用	システム 保守 費用	費用合計	開発期間
水平階層型	24	3	4	12	12	55	10
垂直型	27	17	10	25	25	104	12
水平/垂直	0.89	0.18	0.40	0.48	0.48	0.53	0.83

単位	工数=人日
	費用=百万円
	開発期間=月

#### 4. 5. 10 数値検証の計算根拠

##### (1) システム構成作成工数

Kht：水平階層型システム構成作成工数

Kvt：垂直型システム構成作成工数

K1：既存のシステム構成調査工数

K2：ソフトウェア構成調査工数

水平階層型：K1=0、K2=0

$$Kht=K1+K2=0$$

垂直型：K1=10、K2=20

$$Kvt=K1+K2=30$$

##### (2) 基本設計工数

Sht：水平階層型基本設計工数

Svt：垂直型基本設計工数

S1：バックアップ方法の設計工数

S2：プログラム移行方法の設計工数

S3：プログラム仕様設計工数

S4：制御機能の設計工数

S5：画面仕様設計工数

S6：帳票仕様設計工数

水平型階層型：S1=3、S2=10

$$S_{ht}=S_1+S_2=13$$

垂直型 :  $S_3=10$ 、 $S_4=20$ 、 $S_5=20$ 、 $S_6=4$

$$S_{vt}=S_3+S_4+S_5+S_6=54$$

### (3) 制御プログラム作成工数

表4-3 制御プログラム作成各パラメータ数値表

		作成工数 (工数/数)	水平階層型システム			垂直型システム		
			作成数	工数	工数小計	作成数	工数	工数小計
画面作成	移行画面	1	10	10	---	0	0	---
	機器単体	1	65	65	---	65	65	---
	プロセス	3	1	3	78	10	30	95
シーケンス制御プログラム作成	シーケンス移行	4	10	40	---	0	0	---
	シーケンス製作	10	0	0	40	10	100	100
データ処理バッチプログラム作成	バッチ移行	2	5	10	---	0	0	---
	バッチ製作	10	0	0	10	5	50	50
アナロググループ制御プログラム作成	アナログ製作	3	35	105	105	35	105	105
ドキュメント作成	ドキュメント既存転用	5	0	0	---	0	0	---
	新規ドキュメント作成	20	1	20	20	1	20	20
			工数総計		253	工数総計		370

#### ① 画面設計作成

G<sub>ht</sub> : 水平階層型画面作成工数

G<sub>vt</sub> : 垂直型画面作成工数

G<sub>k1</sub> : 1画面当り既存のシステム画面移行作成工数

G<sub>hx1</sub> : 水平階層型既存のシステム画面移行画面数

G<sub>vx1</sub> : 垂直型既存のシステム画面移行画面数

G<sub>k2</sub> : 1画面当り機械単体操作画面作成工数

G<sub>hx2</sub> : 水平階層型機械単体操作画面作成数

G<sub>vx2</sub> : 垂直型機械単体操作画面作成数

G<sub>k3</sub> : 1画面当りプロセス制御画面作成工数

G<sub>hx3</sub> : 水平階層型プロセス制御画面作成数

G<sub>vx3</sub> : 垂直型プロセス制御画面作成数

水平階層型 :  $G_{ht}=G_{k1} \times G_{hx1}+G_{k2} \times G_{hx2}+G_{k3} \times G_{hx3}$

$$=1 \times 10+1 \times 65+3 \times 1=78$$

垂直型 :  $G_{vt}=G_{k1} \times G_{vx1}+G_{k2} \times G_{vx2}+G_{k3} \times G_{vx3}$

$$=1 \times 0+1 \times 65+3 \times 10=95$$

#### ② シーケンス制御プログラム設計作成

S<sub>ht</sub> : 水平階層型シーケンス制御プログラム設計作成工数

Svt : 垂直型シーケンス制御プログラム設計作成工数

Sk1 : 1本当りシーケンスプログラム移行工数

Shx1 : 水平階層型シーケンスプログラム移行本数

Svx1 : 垂直型シーケンスプログラム移行本数

Sk2 : 1本当り新規シーケンスプログラム作成工数

Shx2 : 水平階層型新規シーケンスプログラム作成本数

Svx2 : 垂直型新規シーケンスプログラム作成本数

水平階層型 :  $Sht=Sk1 \times Shx1+Sk2 \times Shx2$

$$=4 \times 10+10 \times 0=40$$

垂直型 :  $Svt=Sk1 \times Svx1+Sk2 \times Svx2$

$$=4 \times 0+10 \times 10=100$$

③ データ処理用バッチプログラム設計作成

Bht : 水平階層型データ処理用バッチプログラム設計作成工数

Bvt : 垂直型データ処理用バッチプログラム設計作成工数

Bk1 : 1本当り既存プログラム移行修正工数

Bhx1 : 水平階層型既存プログラム移行修正本数

Bvx1 : 垂直型既存プログラム移行修正本数

Bk2 : 1本当りバッチプログラム新規設計作成工数

Bhx2 : 水平階層型バッチプログラム新規設計作成本数

Bvx2 : 垂直型システムバッチプログラム新規設計作成本数

水平階層型 :  $Bht=Bk1 \times Bhx1+Bk2 \times Bhx2$

$$=2 \times 5+10 \times 0=10$$

垂直型 :  $Bvt=Bk1 \times Bvx1+Bk2 \times Bvx2$

$$=4 \times 0+10 \times 10=100$$

④ アナログ制御プログラム設計作成

Aht : 水平階層型アナログ制御プログラム設計作成工数

Avt : 垂直型アナログ制御プログラム設計作成工数

Ak : 1本当りアナログ制御プログラム設計作成工数

Ahx : 水平階層型システムのプログラム数

Avx : 垂直型システムのプログラム数

水平階層型 :  $Aht=Ak \times Ahx=3 \times 35=105$

垂直型 :  $Avt=Ak \times Avx=3 \times 35=105$

⑤ ドキュメント作成

Dht : 水平階層型ドキュメント作成工数

Dvt : 垂直型ドキュメント作成工数

Dk1 : 1本当り既存のドキュメント移行工数  
 Dhx1: 水平階層型既存のドキュメント移行本数  
 Dvx1: 垂直型既存のドキュメント移行本数  
 Dk2 : 1本当り新規ドキュメント作成工数  
 Dhx2: 水平階層型新規ドキュメント作成本数  
 Dvx2: 垂直型新規ドキュメント作成本数  
 水平階層型 :  $Dht = Dk1 \times Dhx1 + Dk2 \times Dhx2$

$$= 1 \times 20 + 0 \times 5 = 20$$

垂直型 :  $Dvt = Dk1 \times Dvx1 + Dk2 \times Dvx2$

$$= 1 \times 20 + 0 \times 5 = 20$$

⑥ 制御プログラム作成工数合計

水平階層型総工数 :  $Total = Ght + Sht + Bht + Aht + Dht$   
 $= 78 + 40 + 10 + 105 + 20 = 253$

垂直型総工数 :  $Total = Gvt + Svt + Bvt + Avt + Dvt$   
 $= 95 + 100 + 50 + 105 + 20 = 370$

以上、各工数算出の計算根拠である。

(4) 新規ハードウェア費用

Hht : 水平階層型新規ハードウェア費用

Hvt : 垂直型新規ハードウェア費用

H1 : DCSシステム機器一式の費用

H2 : PLC機器一式の費用

水平階層型 : H1=20、H2=4

$$Hht = H1 + H2 = 20 + 4 = 24$$

垂直型 : H1=20、H2=7

$$Hht = H1 + H2 = 20 + 7 = 27$$

(5) 基本ソフトウェア費用

Soht : 水平階層型基本ソフトウェア費用

Sovt : 垂直型基本ソフトウェア費用

So1 : 既存ソフトウェアのバージョンアップ費用

So2 : DCSパッケージソフトウェア費用

So3 : 制御エンジンソフトウェア費用

So4 : 生産管理パッケージソフトウェア費用

水平階層型 : So1=3、So2=0、So3=0、So4=0

$$Soht = So1 + So2 + So3 + So4 = 3 + 0 + 0 + 0 = 3$$

垂直型 : So1=0、So2=10、So3=4、So4=3

$$\text{Sovt}=\text{So1}+\text{So2}+\text{So3}+\text{So4}=0+10+4+3=17$$

(6) システム環境構築費用

Skht：水平階層型システム環境構築費用

Skvt：垂直型システム環境構築費用

Sk1：サーバー環境設定費用

Sk2：端末環境設定費用

Sk3：データベース構築費用

Sk4：既存のデータ移行費用

水平階層型：Sk1=0、Sk2=1、Sk3=1、Sk4=2

$$\text{Skht}=\text{Sk1}+\text{Sk2}+\text{Sk3}+\text{Sk4}=0+1+1+2=4$$

垂直型：Sk1=2、Sk2=2、Sk3=2、Sk4=4

$$\text{Skvt}=\text{Sk1}+\text{Sk2}+\text{Sk3}+\text{Sk4}=2+2+4=10$$

(7) テスト費用

Tht：水平階層型テスト費用

Tvt：垂直型テスト費用

Tc1：社内テスト費用

Tc2：1回当たり現地切替テスト費用／テスト回数

Thr：水平階層型での現地切替テスト回数

Tvr：垂直型での現地切替テスト回数

水平階層型：Tc1=3、Tc2=1.5、Thr=6

$$\text{Tht}=\text{Tc1}+\text{Tc2}\times\text{Thr}=3+1.5\times6=12$$

垂直型：Tc1=7、Tc2=1.5、Tvr=12

$$\text{Tvt}=\text{Tc1}+\text{Tc2}\times\text{Tvr}=7+1.5\times12=25$$

(8) システム保守費用

M：システムの年間保守費用

水平システム：M=12

垂直システム：M=25

## 4. 6 本章のまとめ

インダストリー4.0は、DX (Digital Transformation)、CPS、及びシステムの接続性に重点を置いている。各デバイスは、インターネット、イントラネット、Wi-Fi通信、そして、その他のICTを介して相互に接続される。

本章では、乳製品製造工場の実用的な事例研究を用いて、水平階層型システムモデルを提案した。水平階層型システムでは5階層のモジュール化された設計のため、製造システム構築において、製品、機械、及び人的資源に応じてモジュールの組合せを選択することができる。製造、物流オペレーションの基本機能は変化していないが、設備技術、システム技術の発展により、オペレーションの精度、粒度、スピードは飛躍的に向上している。今後OTとITはさらに統合して、ロボティクスによる自動化、SCMとMESの連動によるサプライチェーン効率化等が達成され、広域なスマートファクトリーグループが形成されていくことになるであろう。このような対応にも、各プラントでの水平階層型システムモデルは、大きく貢献できる工場全体のシステムモデルである。

水平階層型システムモデルでは、システム構成がシンプルになり、システム全体を簡単に統合及びアップグレードできる。そのため、設備を新規導入及び更新する時に、共通モジュールと個別最適化を組合せたシステム構築及びシステム拡張が容易であり、工場全体のシステムアーキテクチャと制御システムの設計作成は、複雑な変更を模索したりすることなく実装でき高い費用がかからない。よって、開発期間、開発費用、作業員教育費用を抑えることができる。

今回提案した水平階層型システムでは、乳製品製造システムの包括的な設計をして、各階層の特性と役割を提示している。特に、MTである、製造管理の上で重要な品質管理、設備保全管理、製造衛生管理、ライン安定稼働に関する技術ノウハウはシステムユーザー側に帰属していることが多いため、同業他社だけでなく、他業種への横展開が可能になる。そして、デジタル製造標準、デジタル作業標準が各階層の適応業務に応じて構築され、それが新規に建設されるプラントへシステムとして導入されることにより、作業教育の簡素化、ヒューマンエラーの防止、早期立上げの実現、稼働管理の標準化、製造管理の標準化ができる。そのためにも、プラントに導入される製造システムは階層と役割機能を明確にして構築する必要がある。

次に、提案した水平階層型システムの機能を評価し、効果の数値検証としては、システム開発データ（コストと工数）を分析し、従来の垂直型システムに比べ、トータルで30～50%のコスト削減での構築が容易であることを検証した。

本章で提案しているシステムモデルは、スマート化をめざす、乳製品工場を初めとする食品製造工場の製造システムを構築するための実用的な参考資料となる。また、システムユーザーが、製造、運用、制御、製造管理、品質管理、リスク管理、トレーサビリティ管理などのOTやMTのノウハウをシステムに蓄積することで、設備ベンダーやシステムベンダーだけでなく、システムユーザーが各階層の機能モジュールを提供することにより、新たなエンジニアリング事業を展開することができるようになる。

以上、本章では水平階層型システムモデルの有効性と、当該モデルがスマートファクトリー構築に大きく貢献できることを提案した。

## 第 5 章 結論と将来の展望

本研究は、スマートファクトリーの具体的な構築のステップを、ランドデザイン、個別デザイン、運用システム、SCMとの連携により構成することとし、食品工場のスマートファクトリー構築を具現化するための設備配置設計とシステム構成モデルを提案することを目的とした。

食品製造業を対象とした理由は、食品製造業は労働力不足と労働の質の改善という大きな問題を持っている。それを解決するため、スマートファクトリーを構築し有効活用することは、物流を含め、その会社の効率化と収益改善に大きく貢献するためである。

SCMの効率化とスマートファクトリー構築の前提条件となるサプライチェーン視点からの日本の食品産業の効率化を調査分析現状を調査分析したが、生産・物流のスマート化やスマートファクトリー構築まで至ったものはなかった。

学術文献調査でも、インダストリー4.0 の概念論やスマートファクトリーのアーキテクチャ、構成するコンポーネントに関するものがほとんどであった。先端技術については、通信技術、CPS、IoT等IT技術に関するものが多く、利用技術や応用技術に関するものや、おのおの先端技術の連携に関するものは見つけることができなかった。

そこで、大手食品会社のスマートファクトリー構築のステップにおいて連携すべきSCMの事例を分析し生産計画のアルゴリズムを作成した。

スマートファクトリーのランドデザインとしては、同様に大手食品会社の新事業所（新工場と総合物流センター）建設を事例として分析を行った。この新事業所は、日本にインダストリー4.0 の概念が導入されスマートファクトリーが提唱される以前に建設されている。建設の最大のコンセプトは、SCMの効率化と最大限の強化を達成し、収益構造を改革することであった。これは、現在のスマートファクトリーのコンセプトとほぼ同様なものである。そして、この事例における新工場と総合物流センターの機能要求、基本設計、効果の評価を行った。

また、プロセスチーズ工場の事例研究を基にして、スマートファクトリーの個別デザインである製造ライン設計問題及び工場全体のシステム構成とシステム運用について研究と提案を行った。

プロセスチーズの重要な工程である乳化と充填の連続した2工程は、非連続型ディスクリート生産方式とプロセス型生産方式、連続型ディスクリート生産方式が混在した製造ラインである。

提案モデルである製造ライン設計問題では、この2工程を対象にして、製造ライン設計問題を投資最適化問題と運用最適化問題に分離した。投資最適化問題では、最大需要を満たす生産能力を有す設備能力と設備台数を算出した。運用最適化問題では、需要を各期に分けて、各期別の設備稼働台数を求めるモデルとした。さらに、従来の最適化問題では提案されていない2工程間の能力差によって生じる損失費用をペナルティ費用として、稼働費用に加算するモデルとした。そして、目的関数を最小化する設備能力と台数を求める2次整数計画式を提案した。また、解法のアルゴリズムを開発し、実務に使用できるモデルとした。さらに、数値実験を行いモデルの有効性を検証した上で、本モデルを使用し実際に設置されている設備構成の評価を行い最適な稼働の考察を行った。その結果、ペナルティ費用が減少するような設備運用をすることで、総費用の削減に大きく貢献することが解った。

そして本ライン設計モデルは、以下の点でスマートファクトリー構築に貢献できるものである。

本提案はモデル式だけでなく制約式と解法アルゴリズムを提案しており、特別なシステムを使用することなく通常のパソコンと汎用ソフトで解を求めることができる。よって、様々な条件で繰返しライン設計をシミュレーションすることができる。よって、ブロック化された設備モジュールの設計は柔軟性を持つことができ、スマートファクトリーが求める設計の効率化と運用最適化に大きく貢献する。

ペナルティ費用の算出には $\alpha$ （同期化係数）と $\beta$ （柔軟性係数）を任意に設定することとし、製品特性や設備特性に合致した費用を算出することができるため、最適投資と最適運用の解はラインの実態を考慮した精度の高いものを得ることができる。

ラインの新設は大きな投資を伴うためそれほど多くはできない。そこで、既存ラインをスマート運用することが非常に重要である。本モデルは既存ラインの効率的な運用に対して以下のような貢献ができる。

外部環境の変化や需要動向の変化に対して、稼働時間の増減、設備改良による設備能力の増減、設備台数の増減という3つの要因について、どの方策が最も有利であるか判定する時に本モデルは適応できる。また、複数工場を有する場合、どの工場で製造するのが有利であるか判定する時にも適応できる。

本モデルの運用最適化は期ごとに分けて算出している。今回の数値検証では、年間を月別12回に分けて最適解を算出したが、日配型製品や季節変動の大きい製品では、期の設定を日別1か月、週別4半期等に設定することにより、実態に合った運用最適解を求めることができる。

以上、スマートファクトリーが求める外部環境の変化に柔軟に対応して、最適な設備投資と設備運用に対して大きく貢献するライン設計モデルにすることができた。

今後の課題として、以下のことが挙げられる。工程の垂直方向への拡大、前工程（乳化工程）1ブロックに対して後工程（充填工程）が複数ブロックある場合のモデル対応、製造する品種が複数ある場合のモデル対応、バッファリングのためのアキュム設備の必要性のモデルによる判定等が考えられる。問題が大規模になっても、汎用ソフトの適用範囲を拡大するために、モデル式を整数計画問題として定式化することの検討も重要である。以上のことから、本モデルはさらに研究を進めモデル適用の拡大と改良を進める価値のあるものである。

次に、工場全体のシステム設計と運用モデルの提案では、食品工場全体のシステム構成を従来の垂直型モデルではなく水平階層型システムモデルにすることにより、インダストリー4.0 の概念及びスマートファクトリーに適合することを提案した。

本提案では、工場全体のシステムに有効なアーキテクチャとコンポーネントの組合せによるシステム構成とOTやMTの技術移転、システムの拡張性、スマートファクトリーに貢献するシステム運用を主として提案している。これはスマートファクトリー実現のために非常に重要であると筆者は認識している。まず、各水平階層のシステム機器構成とシステムの機能を示し、水平階層型システムモデルの形式を明確化した。筆者の調査では、このように体系化されたシステムモデルを導入している食品工場はなく、システムベンダーの提案もない。今後のスマート化に対応するためには、このような柔軟性の高いシステムモデルが提唱され、導入されていくことが必須である。

そして、このモデルの機能を評価し、水平階層型システムモデルの有効性を検証し、標準化やシステムモジュール化、システム接続統合化が容易であることが認められた。システム運用の評価では、効率的な技術管理と技術移転、製品の安全性の確保、ロボットラインの効率運用ができることも認められた。

数値検証としては実際の事例を基にして、システム更新時の垂直型システムと水平階層型システムの開発工数、発生する費用、教育、保守等の比較を行ったが、30%～50%の削減を検証した。

そして水平階層型システムモデルは、以下の点でスマートファクトリーに貢献できる。

本システムモデルは、各階層の中でどの階層で機能、データ、UI等を共通化するべきか明確にすることができるため、オペレーションの標準化と各階層にシステムモジュールを作成することが容易にできる。このことは、システムの拡張や新規

導入の際に、作業手順とシステムモジュールの組合せでマージナル対応できるため、オペレーションとシステムが統合でき、開発効率とコスト抑制に大きく貢献できる。

I T技術の開発は急速に進んでいるが、これらの技術の導入は各階層の要件仕様を決定し、各階層のI Tレベルを統一化し統合する必要がある。先端技術の導入が各階層でばらばらになると、システム構成と接続が複雑になり、システム更新、複数システムの統合が困難になる。特に、I o Tデータを第1階層や第2階層から直接サイバー空間に上げるソリューションが多いが、これは工場全体システムの体系を無秩序にする可能性があり、横展開をする時に機能やデータのレベルが不統一になってしまう。水平階層型システムモデルは適切にサイバーとフィジカルの区分を設定でき、C P S構築に貢献するモデルである。また、階層ごとの要件仕様を共通化することで、各階層に適合した先端技術やデバイス及びインターフェース等の開発要件が明確になり、各階層のI Tレベルが統一化できる。これは、開発メーカーとシステムユーザー両方に大きなメリットとなりスマート化推進に貢献できる。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。まず重要なことは安全性の確保としてセキュリティ対応である。システムで稼働している工場では、サイバー攻撃等でシステムに支障がでるとラインの稼働が停止したり、製造管理ができなくなる。さらに、制御システムに支障がでると作業者の安全に係る問題になる。そして、サイバー攻撃によるデータの漏洩問題も発生する。これらを防止するための防御対策を導入する必要がある。ネットワークトラブルの対応策も同様に重要な課題である。ネットワークトラブルで上位階層との連携ができない場合も想定して各階層のシステム要求仕様とオペレーション標準を作成する必要がある。また、上記2点に対する技術開発も重要に課題である。水平階層型システムは、統合化された大量のデータを取得できるが、このデータを解析し有効活用できるようにフィードバックをしてスマート化を推進していく必要がある。

以上、水平階層型システムモデルでは、インダストリー4.0の概念であり、スマートファクトリーの要件である、O TとI T、M TとI Tの融合と統合による、システムとオペレーションの統合が達成でき、スマートファクトリー構築と運用に大きく貢献するものである。

最後に将来の展望について述べる。第3章で提案したライン設計モデルを拡張及び改良しライン設計の応用モデルを体系的していくことにより、製造工程にはブロック化された標準モジュール群が形成されていく。この製造工程を水平階層型システムで運用することにより、統合化、標準化、最適化ができるようになっていく。そして、設備とI Tの統合ができスマートファクトリーがめざす需要の柔軟性に対応するために生産能力が可変に対応できると共にコスト最適化が達成できるようになる。具体的には、第4、第5階層で投資最適化案を求め年度の設備投資計画を

立案する。そして、第4、第3階層で運用最適化問題を解き期ごとの製造計画を立案する。これが第2階層に指示され最適なライン稼働と管理ができるようになる。

現在のIoTはデータの収集と解析までが多いが、将来的にはサイバーから各階層のフィジカルにフィードバックされ、適切な運用効率化に貢献するようになる。また、食品業界は、人手不足や技術者不足に対応するロボットの導入を進めていく必要がある。先端技術では、ロボット技術はITとの統合により、人間に代わってロボットが機械を操作しシステムにパラメータを設定するようになるであろう。食品業界にこのようなロボティクス技術を導入するには、現在遅れている製造のOTを向上させ、先端IT技術を導入できるように標準化し、高度なOTを確立しモジュール化する必要がある。そのようになった場合、ロボットにシステムのどの階層の機能をオペレーションさせるか明確にすることが重要である。また、ライン設計モデルはこのようなロボットを設備とは別に組み入れて設計できるものが要求される。以上のようなことが技術的に実現できるようになると、自動的にラインや設備の各パラメータが高度にチューニングされることができるようになり、稼働、品質、歩留まり等工場運用が最適化されていくスマートファクトリーの構築となる。

以上の将来展望からも、理論に基づいた再現性のあるライン設計モデルと運用最適化モデル及び工場全体を体系的に運用管理し横展開ができるシステムモデルは将来に貢献できるものである。

以上、本研究の結論と将来展望を述べ本論文の総括とする。

## 参 考 文 献

- [1] Bigliardi B., & Galati F.:“Models of adoption of open innovation within the food industry”, Trends in Food Science & Technology, Vol. 30,No. 1, pp. 16-26 (2013)
- [2] Boland M.:” Innovation in the food industry: personalised nutrition and mass customization”, Innovation, Vol. 10, No 1, pp. 53-60(2008)
- [3] Thoben K.D., Wiesner S., &Wuest T.: “Industrie 4.0 and smart manufacturing a review of research issues and application examples”, International Journal of Automation Technology, Vol. 11, No. 1, pp 4-16(2017)
- [4] JETRO ドイツ駐在事務所翻訳:”「プラットフォーム Industry 4.0」”(2015)
- [5] 藤野直明:「第 4 次産業革命」,日経 BP (2019)
- [6] Hermann M., Pentek T., &Otto B.: ”Design for Industrie4.0 scenarios:A literature review”, Audi Stiftungslehrstuhl Supply Net Order Management (2015)
- [7] Wiktorsson M., Noh S D., Bellgran M., &Hanson L.: “Smart Factories: South Korean and Swedish examples on manufacturing settings”, Vol. 25, pp. 471-478(2018)
- [8] Zhang Y., Zhang G., Wang J., Sun S., Si S., &Yang T.: “Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things”. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 28, No. 8, pp. 811-822(2015)
- [9] Pei Breivold H: “Towards factories of the future: migration of industrial legacy automation systems in the cloud computing and Internet-of-things context”, Enterprise Information Systems, pp. 1-21(2019)

- [10] Dawson T.: “Industry 4.0–Opportunities and challenges for smart manufacturing”(2014)
- [11] Radziwon A., Bogers M., & Bilberg A.: “The smart factory: exploring an open innovation solution for manufacturing ecosystems”, Social Science Electronic Publishing(2014)
- [12] 鹿島哲: “賞味期限を考慮した在庫管理”, 日本生産管理学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 89-94(2002)
- [13] 雪印メグミルク: “再建から経営統合へ 4.生産体制”, 雪印乳業社史第 7 巻, pp. 574-592(2016)
- [14] 久保幹雄: 「ロジスティクス工学（経営のニューフロンティア）」, 朝倉書店(2001)
- [15] 斎藤史哲: “在庫に関する知識共有のブルウィップ効果に及ぼす影響について”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 66, No. 1, pp. 40-48(2015)
- [16] 狭間雅義, 宋宇: “ブルウィップ現象に影響を与える要素の特定”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 58, No. 2, pp. 106-114(2007)
- [17] 鈴木定省, 三島理, 圓川隆夫: “定期発注方式を用いたサプライチェーンにおけるブルウィップ効果の定量化の研究”, 日本経営工学会論文誌, Vol. 56, No. 3, pp. 147-154(2005)
- [18] 池田憲弘: “雪印「6P チーズ」を 1 日に 20 万箱作る、巨大工場の舞台ウラ”, IT media, 2/9(2016)
- [19] 内田三知代: “乳製品の新工場に調達・生産・物流を集約、サプライチェーン全体を 1 か所でコントロール”, LOGI-BIZ, No. 157, pp. 52-56(2014)
- [20] マテリアルフロー編集: “サプライチェーンプロフェッショナルズ 11”, マテリアルフロー, Vol. 58, No. 5, pp. 62-68(2017)

- [21] 厚生労働省,農林水産省:「食品期限表示の設定のためのガイドライン」,2005年  
2月
- [22] 消費者庁:「食品表示法の概要」,2013年6月
- [23] 松本亨, 邊見亮太:“食品ロスの発生要因分析と有効活用策のライフサイクル  
評価”,第26回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿, pp. 3-4(2015)
- [24] 牛久保明邦:”食品産業廃棄物と家庭系食品廃棄物の実態とそのゆくえ”, 廃棄  
物学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 216-227(2003)
- [25] 松本卓夫, 小西寛昭:”技術者の責任と役割”, オートメーション, Vol. 47, No. 8,  
pp.18-22(2002)
- [26] 農林水産省:”食品ロスの削減に資する容器包装の高機能化事例集”, 第2版, pp.  
1-76(2017)
- [27] 原井瞳:”食品流通における「3分の1ルール」の見直し”, SMBC Monthly Re-  
view, pp. 1-2(2013)
- [28] 農林水産省:「食品小売店における納入・販売期限の設定事例について」(2008)
- [29] 河合亮子:”食品ロスの低減に向けて”, 化学と生物, Vol. .55, No. 3. pp. 210-  
213(2017)
- [30] 矢作敏行:”食品の生産・流通の調整と統合”, フードシステム研究, Vol. 3, No.  
2, pp. 2-11(1996)
- [31] L.P Bucklin:”Postponement Speculation and the Structure of Distribution Cha-  
nels”, Journal of Marketing Research”, Vol. 2, No. 1(1965)
- [32] 木立真直:”小売り主導型食品流通の進化とサプライチェーンの階”, フードシ  
ステム研究, Vol. 16, No. 2, pp. 31-44(2009)

- [33] 秋川卓也: "食品卸売業におけるサプライチェーンマネジメントに関する実証研究", 日本物流学会誌, Vol. 12, No. 5, pp. 167-173(2004)
- [34] 島田克美: "フードシステムのインテグレーターとしての総合商社", 産業学会研究年報, Vol. 2000, No. 15, pp. 75-83(2000)
- [35] 宮崎崇将: "SCMにおける情報とオペレーションとの統合についての検討", 流通, No. 21, pp. 47-60(2007)
- [36] 富山武夫: "我が国における食品トレーサビリティの展開方向", 日本食生活学会誌, Vol. 14, No. 3, pp. 164-171(2003)
- [37] 農林水産省消費・安全局: 「食品のトレーサビリティ」  
<http://www.maff.go.jp/j/syouan/seisaku/trace/index.html>"(2019)
- [38] 檜田智子: "食品企業における社会的責任の動向", 日本経営診断学会論集, Vol. 5, pp. 372-384(2005)
- [39] 清原昭子: "食の安全と信頼の確保に関わる施策の展開と課題", フードシステム研究, Vol. 22, No. 1, pp. 19-24(2015)
- [40] 松野成悟: "サプライチェーンにおけるトレーサビリティシステム構築の現状と課題", 日本生産管理学会論誌, Vol. 11, No. 2, pp. 133-138(2005)
- [41] 日経 BP 社: "全拠点で生産履歴を追跡できる体制構築", 日経情報ストラテジー, Vol. 12, No. 4, pp. 166(2003)
- [42] 松野成悟, 時永祥三: "モジュール化におけるオープンネットワークの役割と企業間のコラボレーション", 生産管理, Vol. 1, No. 2, pp. 71-76(2003)
- [43] 松野成悟, 時永祥三: "契約関係に注目したモジュール生産におけるトレーサビリティ分析の基本モデル", オフィス・オートメーション, Vol. 5, No. 1, pp. 75-81(2004)

- [44] 國領二郎: "トレーサビリティとシェアリングエコノミーの進化", 研究技術計画, Vol. 32, No. 2, pp. 105-116(2017)
- [45] 金 成學: "食品安全供給システムのあり方に関する研究", フードシステム研究, Vol. 11, No. 3, pp. 33-46(2005)
- [46] 小林正宜, 芦屋讓, 長山貴之, 森川晃好, 長井直士: "飲料製造工場における新しいトレーサビリティとアカウントビリティのシステム構築", 日本食品工学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 99-104(2010)
- [47] 清野誠喜: "食農連携による垂直的チェーン", フードシステム研究, Vol. 19, No. 2, pp. 117-120(2012)
- [48] 中野幹久, 浜崎章洋, 播磨隆弘, 上田純子: "競合企業同士の物流提携に関する一考察", 日本物流学会誌, No. 12, pp. 57-64(2004)
- [49] 小田志保: "プロセスチェーンの市場定着への乳業メーカーの役割", 農中総研調査と情報, No. 69, pp. 8-9(2018)
- [50] 雪印メグミルク: "再建から経営統合へ 15.SCM システムの構築", 雪印乳業社史第7巻, pp. 713-720(2016)
- [51] 秋川卓也: "S&OPの実現要因 —カルビーの事例考察から—", 流通研究, Vol. 17, No. 1, pp. 1-21(2014)
- [52] Jiri Tupa, Jan Simota, Frantisek Steiner: "Aspects of risk management implementation for Industry 4.0", Procedia Manufacturing, Vol. 11, pp. 1223-1230(2017)
- [53] Bahrin, Othman, Nor Hazli, Talib: "Industry 4.0: "A review on industrial automation and robotic", Jurnal Teknologi, No. 78, pp. 6-13(2016)
- [54] Yongkui Liu, Xun Xu: "Industry 4.0 and Cloud Manufacturing: A Comparative Analysis", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 139, Issue. 3(2017)

- [55] A.C.Pereira, F.Romero: “A review of the meanings and implications of the Industry 4.0 concept”. *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 1206-1214(2017)
- [56] Andreja Rojko: “Industry 4.0 Concept: Background and Overview”. *IJIM*, Vol. 11, No. 5(2017)
- [57] Ray Y., Zhong, Xun Xu, Eberhard Klotz b, Stephen T: “Newman Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review 104”, *Engineering*, Vol. 3, Issue. 5, pp. 616–630(2017)
- [58] Issa A., Hatiboglu B., Bildstein A., Bauernhansl T: “Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment”, *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, pp. 973-978(2018)
- [59] SunilLuthra, Sachin KumarMangla.: “Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies Evaluating”. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 117, pp. 168-179(2018)
- [60] Duarte S., Cruz-Machado V.: “Exploring linkages between lean and green supply chain and the industry 4.0” In: *International Conference on Management Science and Engineering Management Springer Cham July*, pp. 1242–1252(2017)
- [61] Bechtsis , D., Tsolakis N., Vlachos D., Iakovou E.: “Sustainable supply chain management in the digitalization era: the impact of Automated Guided Vehicles”. *Journal of Clean Prod*, Vol. 142, part. 4, pp. 3970–3984(2017)
- [62] de Sousa Jabbour A.B.L., Jabbour C.J.C., Foropon C., Godinho Filho M.: “When titans meet-Can industry 4.0 revolutionize the environmentally sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors”, *Technological Forecasting and Social Change* Vol. 132, pp. 18-25,  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017>(2018)

- [63] Gilchrist A.: “Introducing industry 4.0”, In: Industry 4.0 A press, pp. 195–215(2016)
- [64] Branke J., Farid S.S., Shah N.: “Industry 4.0: a vision for personalized medicine supply chains?”, Cell Gene Ther. Insights, Vol. 2, No. 2, pp. 263–270(2016)
- [65] Stock T., Seliger G.: “Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0”, Procedia CIRP Vol. 40, pp. 536–541(2016)
- [66] Brettel M., Friederichsen N., Keller M., Rosenberg M.: “How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: an industry 4.0 perspective”, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, Vol. 8, No. 1, pp. 37-44( 2014)
- [67] Schmidt R., Möhring M., Härting R.C., Reichstein C., Neumaier P., Jozinovic P.: “Industry 4.0-Potentials for creating smart products: empirical research results”, In Proceedings of the International Conference on Business Information Systems, pp. 15–27(2015)
- [68] Shrouf F., Ordieres J., & Miragliotta G.: “Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm”, IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management, IEEE(2015)
- [69] Andrew Kusiak: “Smart manufacturing”, International Journal of Production Research, Vol. 56, pp. 508-517(2018)
- [70] Munera E., Poza-Lujan J.L., Posadas-Yague J.L., Simo J., Blanes J. F., & Albertos, P.: “Control kernel in smart factory environments: Smart resources integration”, IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, IEEE(2015)
- [71] Yoon S., Um J., Suh S.H., Stroud I., & Yoon J. S.: “Smart Factory Information Service Bus (SIBUS) for manufacturing application: requirement, architecture

and implementation”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 30, No. 1, pp. 363-382(2019)

[72] Liu Y., & Xu X.: “Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 139, No. 3(2017)

[73] Weiß M., Tilebein M., Gebhardt R., & Barteld M.: “Smart Factory Modelling for SME-Modelling the Textile Factory of the Future”, In *BMSD*, pp. 328-337(2018)

[74] Lee J., Kao H. A., & Yang S.: “Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment”, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 3-8(2014)

[75] N. Jazdi: “Cyber-physical systems in the context of Industry 4.0”, *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*(2014)

[76] B.T jahjonoa, C. Espluguesb, E. Aresc, G. Pelaezc.: “What does Industry 4.0 mean to Supply Chain?”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 1175–1182(2017)

[77] A.C. Pereira, F. Romero.: “A review of the meanings and implications of the Industry 4.0 concept”, *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 1206-1214(2017)

[78] Wang L., Törngren M., & Onori M.: “Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 37, pp. 517-527(2015)

[79] Yang H., Kumara S., Bukkapatnam S.T., & Tsung F.: “The internet of things for smart manufacturing: A review”, *IISE Transactions*, pp. 1-27(2019)

[80] Tao F., Qi Q., Liu A., & Kusiak A.: “Data-driven smart manufacturing”, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 48, pp. 157-169(2018)

- [81] Liu W., Kong C., Niu Q., Jiang J., & Zhou X.: “A method of NC machine tools intelligent monitoring system in smart factories”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 61, pp. 1-12(2020)
- [82] Yu & He, Tian Chen, Kaiyuan Xu, Zongtang Wu.: “Modelling of Information Systems of Intelligent Manufacturing Monitoring in Smart Factory[C]”, *Advances in Intelligent systems Research*, Vol. 134, pp. 274-277(2017)
- [83] Chen X., Lin W., Liu J., Guan L., Zheng Y., & Gao F.: “Electromagnetic Guided Factory Intelligent AGV”, In *2016 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology*. Atlantis Press(2016)
- [84] Zawadzki P., Żywicki K., Grajewski D., & Górski F.: “Efficiency of Automatic Design in the Production Preparation Process for an Intelligent Factory”, In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance*. Springer, Cham, pp. 543-552, (2018)
- [85] Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L.: “Cyber-physical systems and their security issues”, *Computers in Industry*, Vol. 100, pp. 212-223(2018)
- [86] E.A Lee: “Cyber physical systems: design challenges”, *11th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*, Orlando, Florida, USA( 2008)
- [87] K.H. Johansson: “Control of cyber-physical systems: fundamental challenges and applications to transportation networks”, *27th International Conference on Architecture of Computing Systems*, Lübeck German(2014)
- [88] J.A. Stankovic: “Research directions for the Internet of Things”, *IEEE IoT J*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-9(2014)
- [89] Wahlster, Wolfgang: “From Industry 1.0 to Industry 4.0:Towards the 4th Industrial Revolution”, *Forum Business meets Research*(2012)

- [90] Monostori L., Kádár B., Bauernhansl T., Kondoh S., Kumara S., Reinhart G., Sauer O., Schuh G., Sihn W., Ueda K.: “Cyber-physical systems in manufacturing”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65, NO. 2, pp. 621-641(2016)
- [91] Lee J., Bagheri B., Kao H-A.: “A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems”, *Manufacturing Letters*, Vol. 3, pp. 18-23(2015)
- [92] Kagermann H., Wahlster W., Helbig J.: “Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. “, Final Report of the Industrie 4.0 Working Group(2013)
- [93] Vogel-Heuser B., Kegel G., Bender K., Wucherer K.: “Global Information Architecture for Industrial Automation”, *journal(Automatisierungstechnische Praxis - atp)*, Vol. 57, pp. 108-115(2009)
- [94] M.U. Farooq, Muhammad Waseem, Sadia Mzhar, Anjum Khairi, Talha Kamal.: “A Review on Internet of Things (IoT)”, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 113, No. 1,pp. 1-7(2015)
- [95] Wang Chen: “An IBE-based security scheme on internet of Things”, conference in *Cloud Computing and Intelligent Systems (CCIS)*, Vol. 3,pp. 1046-1049(2012)
- [96] Hui Suo, Jiafu Wan, Caifeng Zou, Jianqi Liu: “Security in the Internet of Things: A Review”, *International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE)*, pp. 648-651(2012)
- [97] Miao Wu, Ting-lieLu, Fei-Yang Ling, ling Sun, Hui-Ying Du: “Research on the architecture of Internet of things”, *Conference in Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, pp. 484-487(2010)
- [98] Xu Cheng, Minghui Zhang, Fuquan Sun: “Architecture of internet of things and its key technology integration based-on RFID” in *Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design*, pp. 294-297( 2012)

- [99] Feng Xia1, Laurence T. Yang, Lizhe Wang & Alexey Vinel: “ Editorial Internet of Things” International journal of communication systems. Vol. 25, pp. 1101-1102(2012)
- [100] Fei Tao, Ying Cheng, Li Da Xu, Lin Zhang, & Bo Hu Li: “CCIoT-CMfg: Cloud Computing and Internet of Things-Based Cloud Manufacturing Service System”, IEEE transactions on industrial informatics. Vol. 10, No. 2(2014)
- [101] 寺嶋正尚, 椿広計: ”小売業専用センターにおける在庫の是非に関する研究”, 日本物流学会誌, No. 16, pp. 185-192(2008)
- [102] 湯川久美子: 「Platform Industrie 4.0 の管理シエルの概要ー調査報告書ー」”, ロボット革命イニシアティブ協議会 IoT による製造ビジネス変革WG(2018)
- [103] 経済産業省: 「Industry 4.0 実証実験」”(2017)
- [104] 松川弘明: “設計と製造をつなげるサイバー・フィジカル・システムの構築で全体最適化を実現”, 工場管理, Vol. 64, No. 15, pp. 19-23 (2018)
- [105] Joseph Harrington: “Computer Integrated Manufacturing”, Krieger Pub Co(1979)
- [106] Posada J., Toro C. Barandiaran I., Oyarzun D., Stricker D., de Amicis R., & Vallarino I: “Visual computing as a key enabling technology for industrie4.0 and industrial internet”, IEEE computer graphics and applications, Vol. 35, No. 2, pp. 2640(2015)
- [107] Wu N.C., Nystrom M.A., Lin T.R., & Yu, H.C.: “Challenges to global RFID adoption”, Technovation, Vol. 26, No. 12, pp. 1317-1323(2006)
- [108] Wu D., Greer M. J., Rosen D. W., & Schaefer, D.: “Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art”, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 564-579(2013)

- [109] E De Cuyper, K De Turck, D Fiems: "Performance analysis of a decoupling stock in a Make-to-Order system", IFAC Proceedings Volumes, Vol. 45, No. 6, pp. 1493-498(2012)
- [110] 千住鎮雄, 山蔭哲郎: "実践的設備投資分析の要点と実例", 日本経営工学会誌, Vol. 39, No. 6B, pp. B40-B45(1989)
- [111] 武田朗子, 内平直志, 中本政志, 松本茂: "不確実な電力事業環境下における発電設備投資計画法", 日本経営工学会論文誌, Vol. 56, No. 5, pp. 366-376(2005)
- [112] 今井潤一: 「リアル・オプション」, 中央経済社 (2005)
- [113] 稲田周平, 市来崎治: "単一製品の販売価格・販売量・市場寿命の不確実性に対する製造投資案の安全性分析", 日本経営工学会論文誌, Vol. 70, No. 2(2019)
- [114] E De Cuyper, K De Turck, D Fiems: "A queueing theoretic approach to Decoupling inventory", Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications:19th International Conference, ASMTA 2012, Grenoble, France, June4-6, pp. 150-164(2012)
- [115] 長島良治: "需要の変動に対応する自動化生産システム", 計測と制御, Vol. 48, No7, pp. 552-557(2007)
- [116] 和田拓己, 荒川雅裕: "生産の平準化と仕掛かり量最小化のための混流ラインの設計と評価", 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 835, p.15-00492, pp. 1-13(2016)
- [117] S Kamble A Gunasekaran, S Gawankar: "Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives", Process Safety and Environmental Protection, Vol. 117, pp. 408-425(2018)

- [118] 日本マテリアルフロー研究センター・情報バンク研究会:「SC 情報バンク研究会報告書」, JMFI(2019)
- [119] Pei Breivold H.: “Towards factories of the future: migration of industrial legacy automation systems in the cloud computing and Internet-of-things context”, *Enterprise Information Systems*, Vol. 14, pp. 542-562(2020)
- [120] Theorin A., Bengtsson K., Provost J., Lieder M., Johnsson C., Lundholm T., & Lennartson B.: “An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0”, *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 5, pp. 1297-1311(2017)
- [121] Ribeiro L., Barata J., & Mendes P.: “MAS and SOA: Complementary Automation Paradigms”, *Innovation in Manufacturing Networks*, pp. 259-268(2008)
- [122] He W., & Xu, L. D.: “Integration of distributed enterprise applications: a survey”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 10, No. 1, pp. 35-42(2013)
- [123] Mondi Anderson: “DCS: How Do They Differ & How Did They Come About?”, *Automation.com*, October 08(2018)
- [124] Jian-Yu Chena, Kuo-Cheng Tai, Guo-Chin Chen.: “Application of Programmable Logic Controller to Buildup an Intelligent Industry 4.0 Platform”, *Procedia CIRP*, Vol. 63, pp. 150–155(2017)
- [125] Moin Shaikh : “Cementing the relationship between DCS and PLC: A review of emerging trends in plant control systems”, *IEEE Cement Industry Technical Conference Record*, pp. 1-12(2009)
- [126] Vanessa Romero Segovia, Alfred Theorin : “History of Control History of PLC and DCS”, *Automatic Control*, pp. 1-24(2013)

- [127] Suhei Dhanani: "Meeting the integration challenge in programmable logic controllers", maxim integrated Company report, Application note 6159, pp. 1-9(2014)
- [128] Niladri Roy: "PLC Architecture in the Industry 4.0 World: Challenges, Trends, and Solutions", Altera Corporation, December, pp. 1-7(2015)
- [129] Rich Harwell: "The integrated HMI-PLC". Industry Application IA05003001E, August, pp. 1-8(2012)
- [130] Zhong R.Y., X Xu & L. H. Wang : "IoT-enabled Smart Factory Visibility and Traceability using Laser-scanners." , Procedia Manufacturing, Vol. 10, pp. 1-14(2017)
- [131] Chryssolouris G., et al.: "Digital manufacturing: history, perspectives, and outlook", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 223, No. 5, pp. 451-462(2009)
- [132] Sherwin Menezes, Savio Creado, Ray Y. Zhong: "Smart Manufacturing Execution Systems for Small and Medium-sized Enterprises", Procedia CIRP, Vol. 72, pp. 1009–1014(2018)
- [133] Delsing J., Eliasson J., Kyusakov R., Colombo A.W., Jammes François, & Nes-saether J.: "A migration approach towards a SOA-based next generation process control and monitoring", IECON2011, pp.4319-4324(2012)
- [134] Dai W.W., Christensen J.H., Vyatkin V., & Dubinin V.: "Function block implementation of service oriented architecture: Case study", IEEE International Conference on Industrial Informatics. IEEE Communications Society, pp. 112-117(2014)

## 謝 辞

本論文は、雪印メグミルク在籍中、慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程開放環境科学専攻に入学し、定年退職までの1年間とその後の研究成果をまとめたものです。

研究活動にあたり、後期博士課程に入学を認めていただいた慶應義塾大学大学院理工学研究科に深く感謝申し上げます。また、会社在籍中に国内留学扱いで入学と研究活動を認めていただいた雪印メグミルク株式会社に深く感謝申し上げます。

まず、最初に感謝申し上げたい方は、慶應義塾大学理工学部管理工学科 松川弘明教授であります。松川教授には雪印メグミルク在籍中スケジューリング学会の私の講演にお越しいただき、多大なご評価をいただきました。そして、慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程へ入学し学術論文を執筆することを強く勧めていただき、私は雪印メグミルク在籍時から退職後は学術と産業界との連携に従事することを目標にしていたこととも合わせ、後期博士課程に入学し研究活動と学位取得することを決意致しました。

企業活動での成果は、業務実践と収益貢献が主であり、学術理論の適用やモデル開発等よりも結果のみが重視されます。松川教授には、まず学術研究の在り方から、学術論文の書き方、研究の進め方等研究活動の初歩から懇切丁寧にご指導いただき、I J P Eに掲載された英文論文と経営工学会論文誌に投稿した論文を作成することができました。

この2本の論文は、雪印メグミルク在籍中に実践したSCM業務改革とシステム開発、阿見工場・阿見総合物流センター建設の事例を主な研究テーマとしています。松川教授には、論文テーマの絞り込みから、アルゴリズムの考え方と作成方法、学術モデル開発方法等、学術研究者としての取組み方と学術理論の作成について、親身になっていただき細かく丁寧にご指導を多大にいただきました。本論文は、松川教授のご指導なしでは完成が難しかったと思います。松川教授には多大なる感謝を申し上げます。今回作成したアルゴリズムとモデルはさらに研究を重ねて、今後は松川教授と協力し、産業界にフィードバックしていければ幸いであると考えています。

第4章の一部である、「Research on horizontal system model for food factories: A case study of process cheese manufacturer」は、松川教授のご指導をいただき、インダストリー4.0に適合し、スマートファクトリー構築に貢献できるシステムモデルを提案することができました。初めての海外論文投稿であり、非常に不慣れであったところ、コレスポンディングオーサーを快くお引き受けいただき、論文の構成、

学術表記、英文表記等細かく丁寧にご指導いただいた、中国西南交通大学 王群智教授に深く感謝申し上げます。そして、論文作成にご助力いただいた、中国西南交通大学 陳井俊様及び社会人ドクターとして、慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程に同期入学し、いっしょに研究を行った中塚昭宏様に感謝申し上げます。中塚様は、2020年3月に博士号を取得、現在青山学院大学ビジネススクール助教をされています。お祝い申し上げます。

第3章の一部である、「プロセスチーズ工場における連続した2工程間ライン設計問題に関する研究」は、新工場建設の事例中から、モデル化すべきテーマを松川教授にご指導いただき、異なる生産方式（プロセス型・ディスクリート型）の連続した2工程における設備能力と設置台数の最適化問題をテーマにし、スマート化に適合できるように、生産能力の同期化と需要に対する柔軟性を取り入れたモデルと解法アルゴリズムを作成することができました。論文のまとめ方等ご指導いただき、経営工学会への論文投稿にご助力いただき、副査を引受けていただいた、慶應義塾大学理工学部管理工学科 志田敬介准教授に感謝申し上げます。また、ゼミで議論し数値実験等でご助力いただきました久保寺静様に感謝申し上げます。

またお忙しい中、副査を快諾していただき、本論文を完成させるために貴重で有益なコメントとご指導いただいた、慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科 中野冠教授、慶應義塾大学理工学部管理工学科 増田靖教授、稲田周平准教授に感謝申し上げます。

私の出身会社である、雪印メグミルク代表取締役社長西尾啓治様には、多大な激励をいただきました。そして、生産技術部装置開発グループの方々には会社在籍時にはご助力いただき退職後も応援していただきました。深く感謝申し上げます。

また、顧問をさせていただいている株式会社アイセン、株式会社ニッコー、タマダ株式会社、トモエ乳業株式会社におかれましては、論文作成に理解をして応援していただいた皆様に感謝申し上げます。

妻真由美は59歳にしての入学を喜んでくれ、コロナ禍の中自宅での執筆に対しておおらかに対応応援してくれました。心にも余裕が生まれ、論文を完成できたと思います。

最後に、本論文作成にサポートいただいたすべての方々に深く感謝申し上げます。

松本 卓夫