

社会連携講座白書 2021

「次世代ものづくりアーキテクチャに向けて」

2022年6月

東京大学大学院工学系研究科人工物工学研究センター社会連携講座

「次世代ものづくりアーキテクチャ」

<http://nextarch.race.t.u-tokyo.ac.jp>

目次

1.	はじめに	1
2.	課題樹形図	2
3.	ものづくり状況の変化	11
3.1.	社会課題の主要要因	13
3.1.1.	環境的 Sustainability	13
3.1.2.	提供価値	15
3.1.3.	Diversity と Inclusion	18
3.1.4.	ものづくりにおける知識や技能の伝承の危機	20
3.1.5.	市場の変化	22
3.2.	解決手法における主要要因	25
3.2.1.	研究開発と設計開発のデジタル化	25
3.2.2.	製造工程のデジタル化	27
3.2.3.	デジタルトリプレット、製品ライフサイクルのデジタル化	30
3.2.4.	アーキテクチャとモジュール化	32
4.	ダイキン工業の現状と課題	36
4.1.	ダイキン工業を取り巻く状況	36
4.2.	ダイキン工業のものづくり部門の現状と課題	37
4.2.1.	これまでの取り組みと課題意識	39
4.2.2.	ものづくり部門の企画層、展開層、実行層の課題	40
5.	次世代ものづくりアーキテクチャ	43
5.1.	次世代ものづくりアーキテクチャとは	44
5.2.	ダイキン工業のものづくり部門の目指す姿	48
6.	共同研究課題	51
	執筆者一覧	52

1. はじめに

「ものづくり大国」と言われてきた我が国は、人々の価値観の変化、持続可能性問題の重大化、世界的な DX の展開とデジタル技術の発展、プラットフォームの支配、新興国製造業の台頭と新興国市場の拡大などの急激な変化について行けなくなりつつあると認識している。一方で、日本は世界に先駆けて直面する人口減少や超高齢化に関わる問題も抱えている。

このような状況変化の中で、今後のものづくりの在り方を明らかにするために、ダイキン工業と東京大学の産学協創協定のもと、2021 年 7 月に社会連携講座「次世代ものづくりアーキテクチャ」を開設した。ここにおけるものづくりは、製品設計、生産、サービス提供、ビジネスモデル、および、サプライチェーン、エンジニアリングチェーンを含む製品ライフサイクルの設計、管理を包含した広い概念である。今後のものづくりは、持続可能社会の実現に貢献しつつ、将来にわたって高い顧客満足度と企業の持続性を達成するものでなければならない。それには、製品、生産システム、製品ライフサイクルを俯瞰的、統合的に捉えることができる「ものづくりアーキテクチャ」の視点が必要になるというのが本社会連携講座の仮説である。このため本講座では、デジタルトリプレットの視点より、知の活動〈形式知・暗黙知・熟練知〉のモデル化を行い、製品アーキテクチャ、スマート工場、バリューチェーン、ビジネスモデル、製品ライフサイクル管理を含む「次世代ものづくりアーキテクチャ」の概念を明らかにし、その具体像を示すことを目指す。

本章冒頭で述べた様々な状況変化は複雑に絡み合い、また、時代とともに日本型製造業の強みや弱みも変化しており、日本型製造業の「次世代ものづくりアーキテクチャ」の要件は必ずしも明確でない。そこで、本社会連携講座の第 1 年目である 2021 年度の活動として、諸課題の整理と次世代ものづくりのために目指す姿の論議を行い、「次世代ものづくりアーキテクチャ」の要件、および、本社会連携講座の教育研究として取り組むべき課題を明らかにするために、本白書を取りまとめた。

今後は、本白書で整理した社会連携講座の教育研究課題に取り組むとともに、その成果を反映させて白書をアップデートし、社会に向けて発信して行く。

2. 課題樹形図

「ものづくり」は顧客・社会の求める「価値づくり」であり、消費者のため、地域社会のため、そして豊かな生活環境の維持・向上のために求められる技術や商品を開発したり、製造したりすることである。しかし、少子高齢化による人材不足、人々の価値観の変化、持続可能性問題の重大化、コロナ、ウクライナ危機など次々と発生する不測の事態による不確実性の常態化、サプライチェーンの再編など大きな変化を迫られている中で、現在とは大きく違う「ものづくり」の姿になることが予想される。この姿を模索することが、持続可能な“次世代ものづくり”の本質的な課題である。

本白書では、これらの諸課題と次世代ものづくりの方向性との関係を整理するために、図 2.1 に示す「課題樹形図」を作成した。この図は大きく分けて左側から、社会一般で広がりつつある課題である「社会課題」、ダイキン工業を始めとする「製造業における課題」、および、「解決手法」を並べ、それらの間の対応関係を整理した。「製造業における課題」は、企業全体に関わる「全社的課題」と「ものづくり部門における課題」にさらに分割した。「社会課題」、「全社的課題」、「ものづくり部門における課題」は、それぞれのカテゴリー内でロジックツリーの手法に従い、重複なくモレなく（MECE）の原則に沿うように樹形図として整理した。その上で、各樹形図間、および、「解決手法」を対応付けた。「社会課題」については、SDGs の考え方に従い、環境的、経済的、社会的持続可能性の三軸で分類した。「ものづくり部門における課題」は、4.2.1 節の分類に従い、企画層、展開層、実行層に分類して整理した。「課題樹形図」の各課題カテゴリーの関係を分析した関係図を図 2.2 に示す。ボトムアップの観点から、「ものづくり部門における課題」から見た、第 2 階層の製造業における課題の「全社的課題」及び第 3 階層の「社会課題」の関係を示している。図 2.2 の課題のフォントのサイズは、樹形図（図 2.1）にある接続関係に基づいて、「ものづくり部門における課題」から「全社的課題」と「社会課題」への接続数を示す。すなわち、フォントの大きな課題は「ものづくり部門における課題」からの接続が多いことを示している。図 2.2 に示したように、「全社的課題」は「プロセスイノベーション」、「サプライチェーンマネジメント（SCM）の抜本的改革」及び「エンジニアリングチェーン（ECM）の抜本的改革」が注目された。社会課題では

「地球温暖化の防止」、「技術競争の激化の対応」及び「個人化の対応」が注目された。また、ものづくり部門における課題を解決するため、「技術力」と「現場力」を強化しつつ「人を中心」の考えを維持しながら、「スマート製造」の実現に向けて、種々の情報を収集し、課題樹形図に示す課題を解決する可能性の高い解決方法を 18 個リストアップした（図 2.3）。人が中心であることが日本の強みであると考えられ、実世界と情報世界や知識・モデル世界を融合させ、人の知的活動を積極的に活用する仕組みのデジタルトリプレットは効果的な技術的手段の一つである。

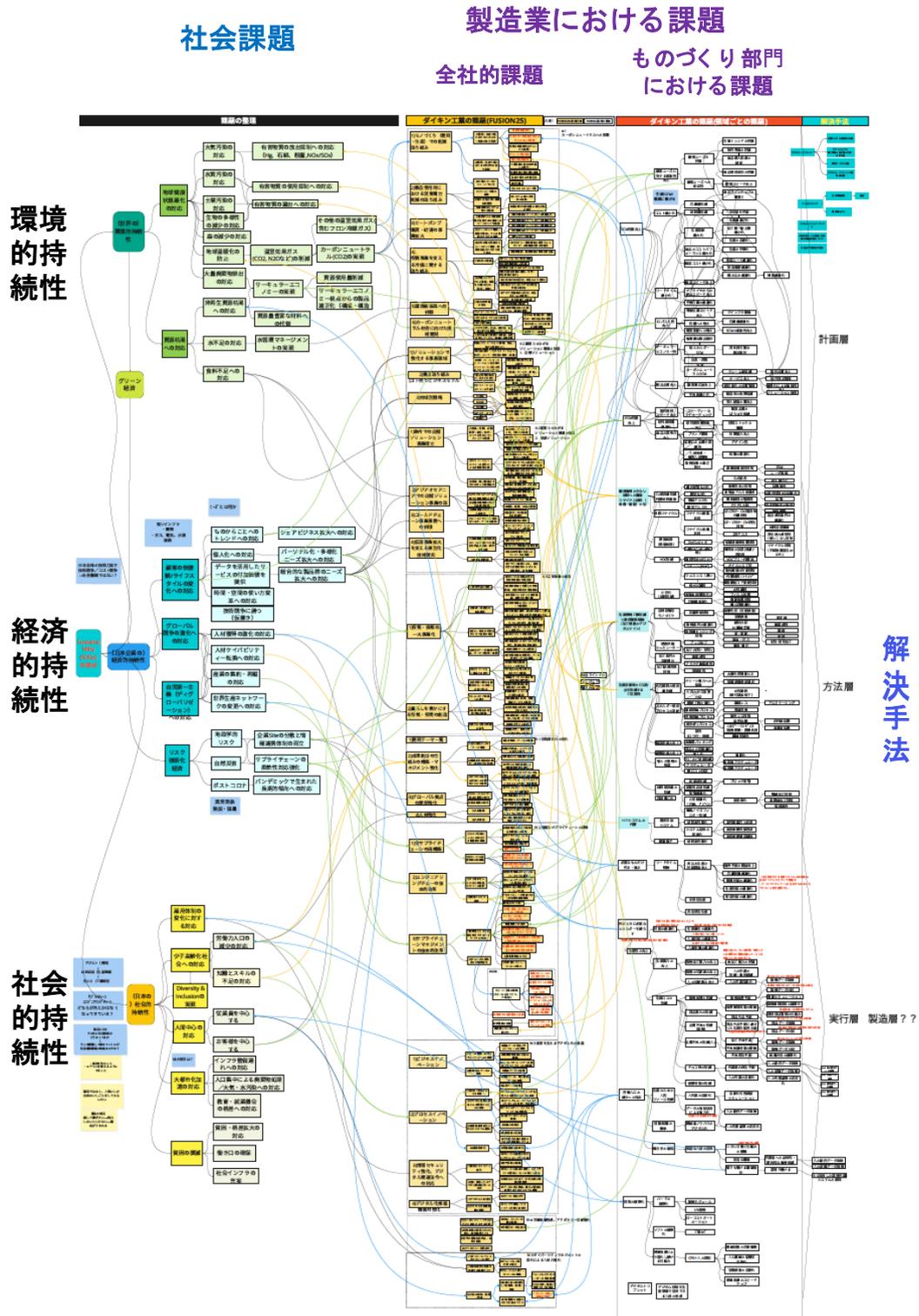


図 2.1 課題樹形図による持続可能なものづくり課題の整理

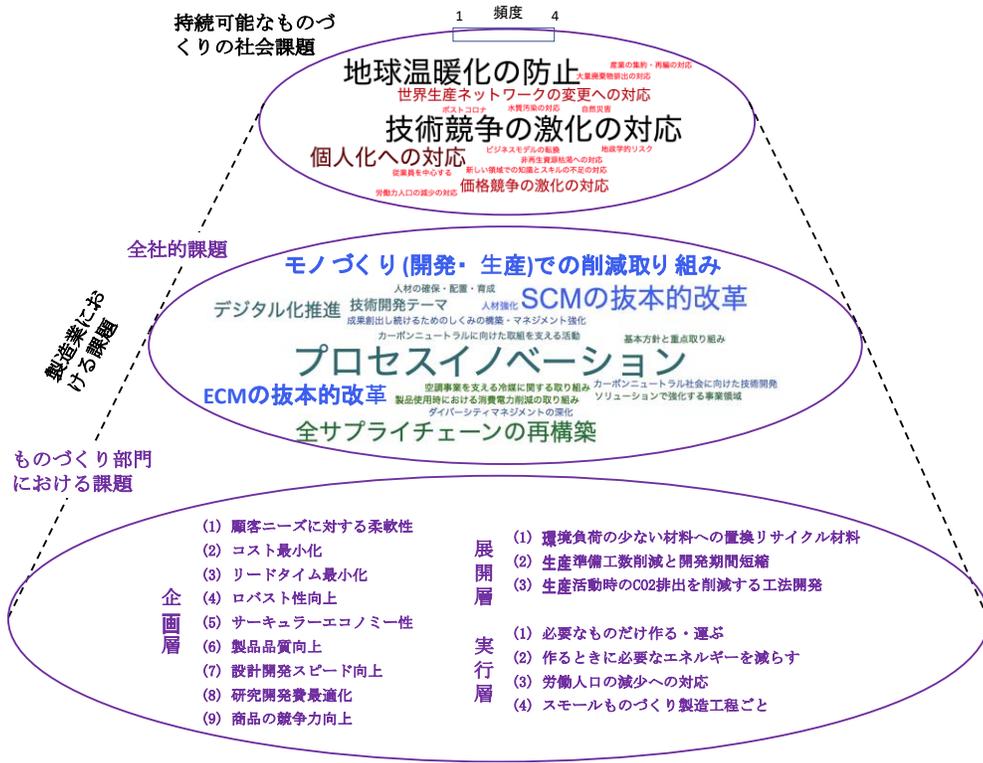


図 2.2 マルチレベル分析によるものづくり部門における課題と社会課題の関係

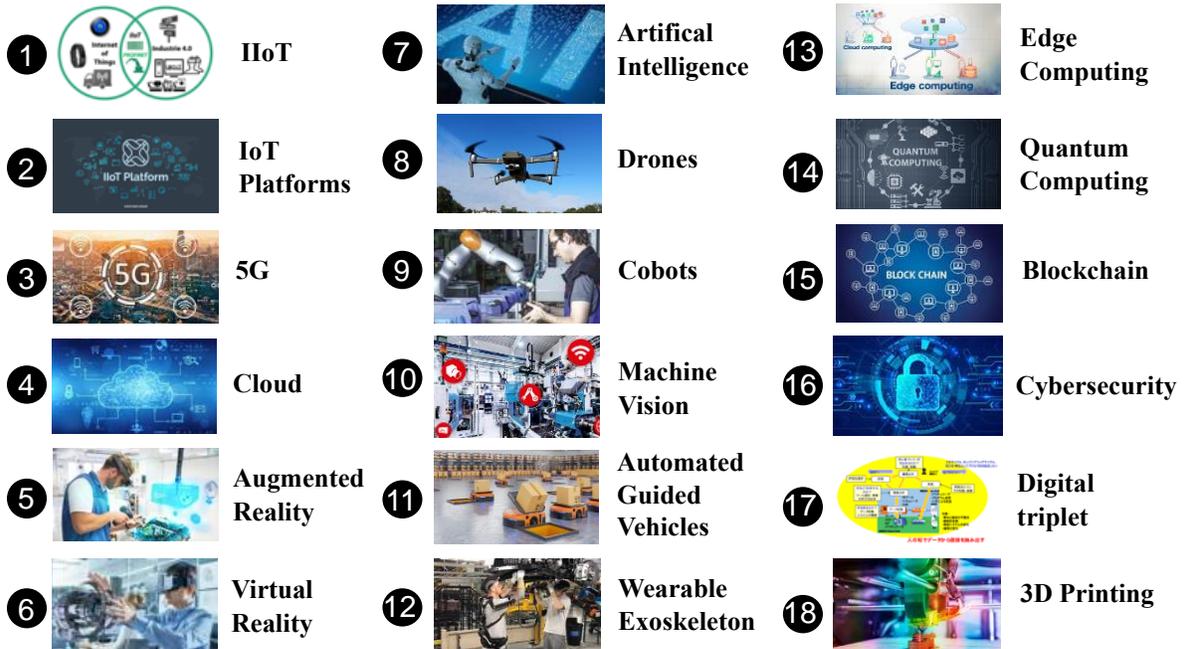


図 2.3 持続可能なものづくり部門における課題向けの主要解決手法

【補足資料】

社会課題の整理

(a) 環境的持続性

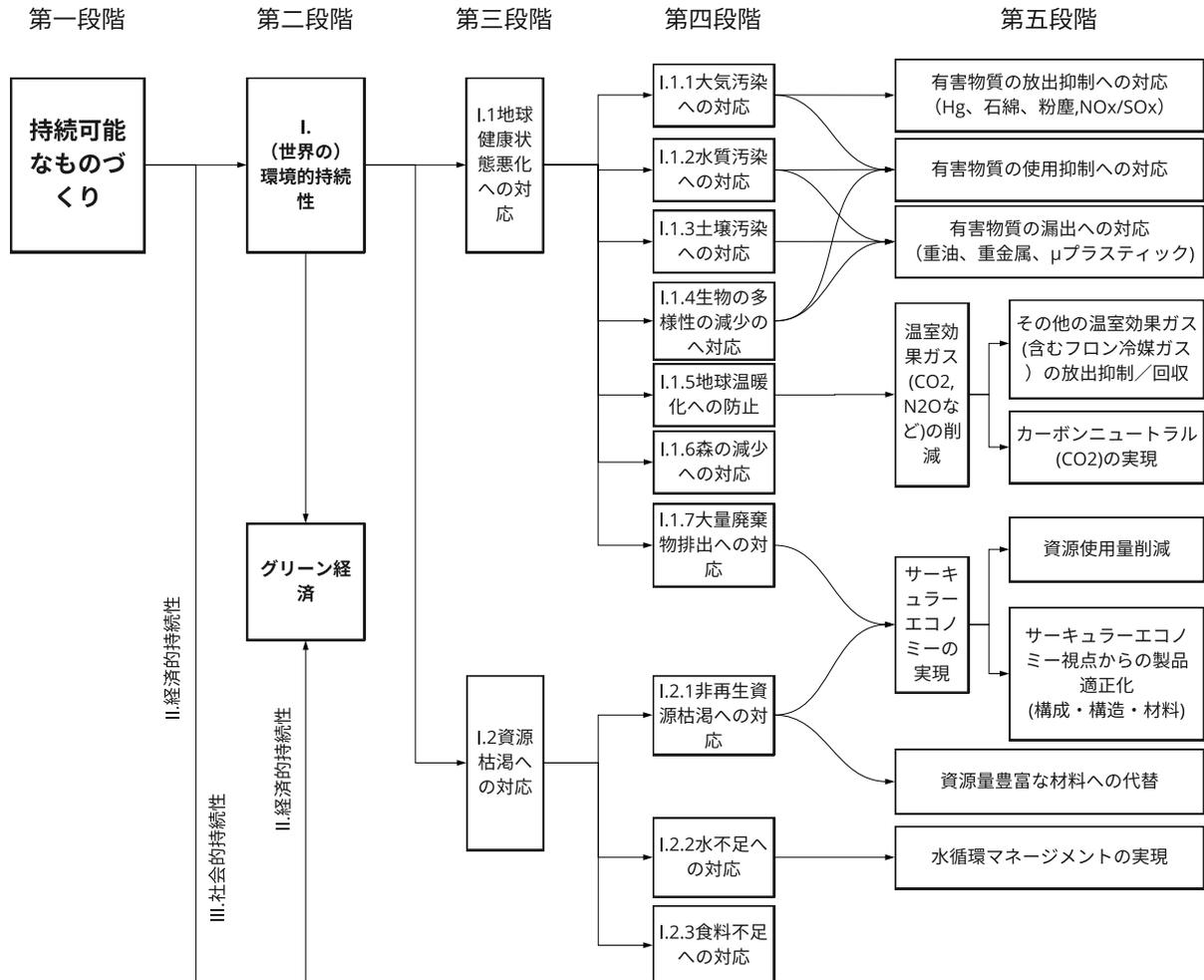


図 2.4 環境的持続性の課題樹形図

(b) 経済的持続性

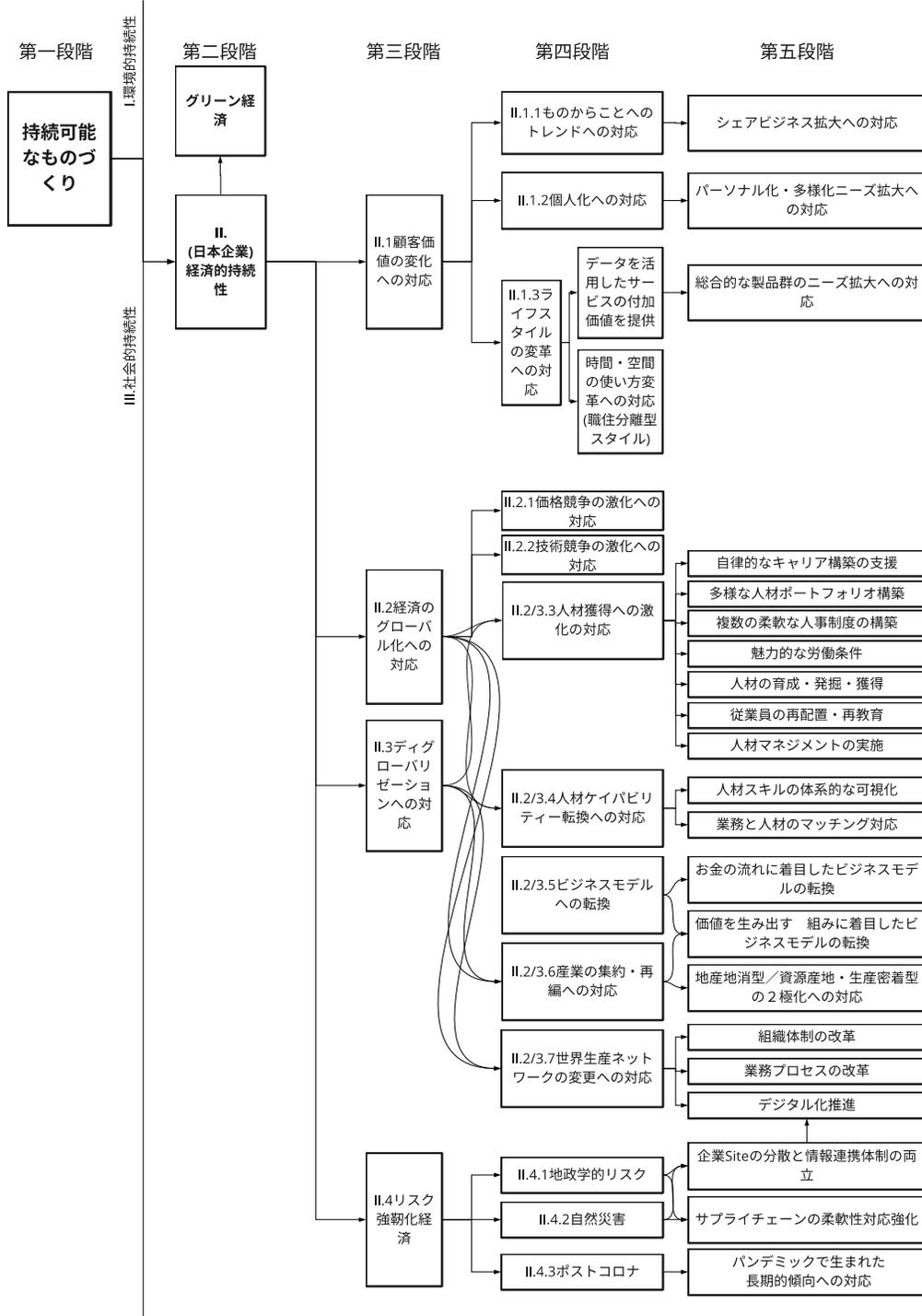


図 2.5 経済的持続性の課題樹形図

(c) 社会的持続性

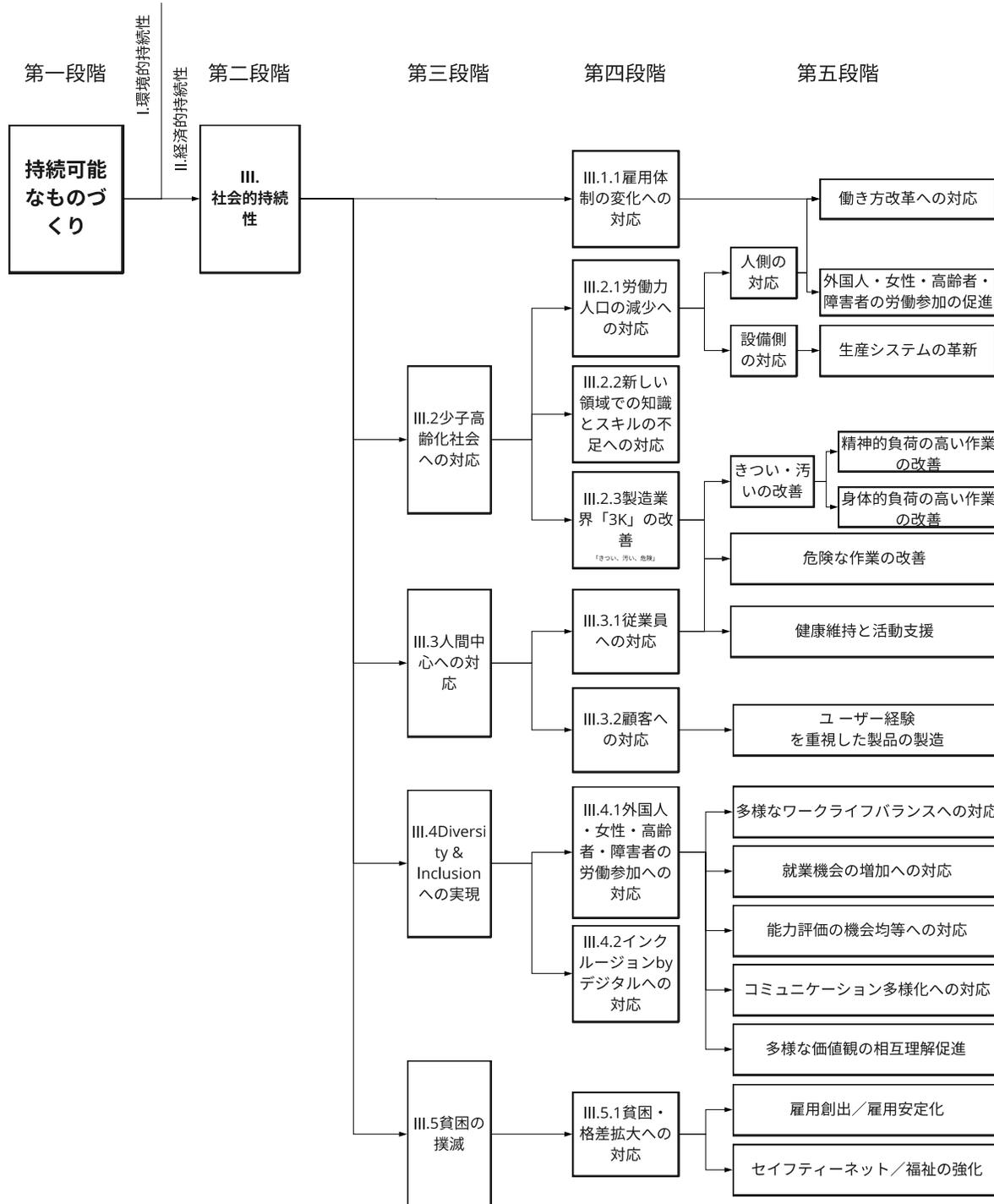


図 2.6 社会的持続性の課題樹形図

製造業における課題整理

(a) 全社的な課題の整理

ダイキン工業の成長戦略加速戦略経営計画「FUSION 25」をもとに、製造業が次世代ものづくりに向けて直面する主な課題をまとめた（表 2.1）。

表 2.1 製造業における全社的な課題と社会課題樹形図への位置付け

Daikin Fusion 25 (上位課題)		第2階層課題	一般課題樹形図への 位置付け
a. カーボンニュートラルへの 挑戦		(1) モノづくり（開発・生産時）での削減	I.1.5
		(2) 製品使用時における消費電力削減	I.1.5
		(3) ヒートポンプ暖房・給湯事業の拡大	I.1.5
		(4) 空調事業を支える冷媒に関する取組み	I.1.5
		(5) 環境新事業への挑戦	I.2.2
		(6) カーボンニュートラル社会に向けた技術開発	I.1.5
b. 顧客とつ ながるソ リューション事業の推 進	空調ソリュー ション		II.1.1、II.1.2、II.1.3
	低温ソリュー ション	(1) 欧州での店舗ソリューション事業確立	I.1.5、I.2.3
		(2) 市場成長が見込めるアジア・オセアニアでの店舗ソリューション事業の強化	I.2.3、II.1.3
		(3) コールドチェーン全体(生産地～消費地)での事業展開への挑戦	II.1.3
c. 空気価値の創造		(1) 空気・換気の一大事業化	II.1.2、III.3.2
		(2) 暮らしを豊かにする空気・空間の創造	II.1.2、II.1.3、III.3.2
d. 技術開発力の強化			II.2.2、II.2/3.2、 II.2/3.4、III.2.1、 III.2.3
e. 強靱なサプライチェーンの構築			II.1.2、II.1.3、 II.2/3.5、II.2/3.6、 II.2/3.7、II.4.1、II.4.2
f. 変革を支えるデジタル化の 推進		(1) ビジネスイノベーション	II.1.2、II.1.3
		(2) プロセスイノベーション	II.1.2、III.2.1、III.2.2

(b) ものづくり部門における課題整理

「ものづくり部門における課題」は、4.2.1 節の分類に従い、企画層、展開層、実行層に分類して整理した。

表 2.2 製造業でのものづくり部門における課題

ものづくり部門における課題	第2階層課題	製造業における全社的課題への位置付け	社会課題樹形図への位置付け	
企画層	サプライチェーンマネジメント(SCM)性能向上	(1) 顧客ニーズに対する柔軟性	b.1、b.2、e.2、e.3	II.1.2
		(2) コスト最小化	e.1	II.2.1
		(3) リードタイム最小化	e.2、e.3	II.2/3.7
		(4) ロバスト性向上	e.1、e.3	II.2/3.7、II.4.1、II.4.2 II.4.3
		(5) 製品ライフサイクルにおける低環境負荷	a.1、a.2、a.4、g.1	I.1.5
		(6) 製品品質向上	d.1、f.2	II.2.2
		(7) 設計開発スピード向上	e.3、f.2、f.4	II.2.2
		(8) 研究開発費最適化	e.2、e.3、f.2	II.2.1
		(9) 商品の競争力向上	e.1、e.2、f.1、f.2	II.2.2
展開層	(1) 環境負荷の少ない材料への置換	a.1	I.1.7、I.2.1	
	(2) 生産準備工数削減と開発期間短縮	d.2、e.3、f.2、f.4	II.1.2	
	(3) 生産活動時のCO2排出を削減する工法開発	a.1、a.6、f.2	I.1.5	
実行層	(1) 必要なものだけ作る・運ぶ	a.1、f.2、f.4	I.1.2、II.1.2	
	(2) 作るときに必要なエネルギーを減らす	a.1	I.1.5	
	(3) 労働人口の減少への対応	d.4、h.1、h.3	III.2.1、III.2.2、III.3.1	
	(4) スモールものづくり (製造工程ごとの標準化とそれに伴う技術開発)	e.1、e.3	II.2/3.5、II.2/3.6	

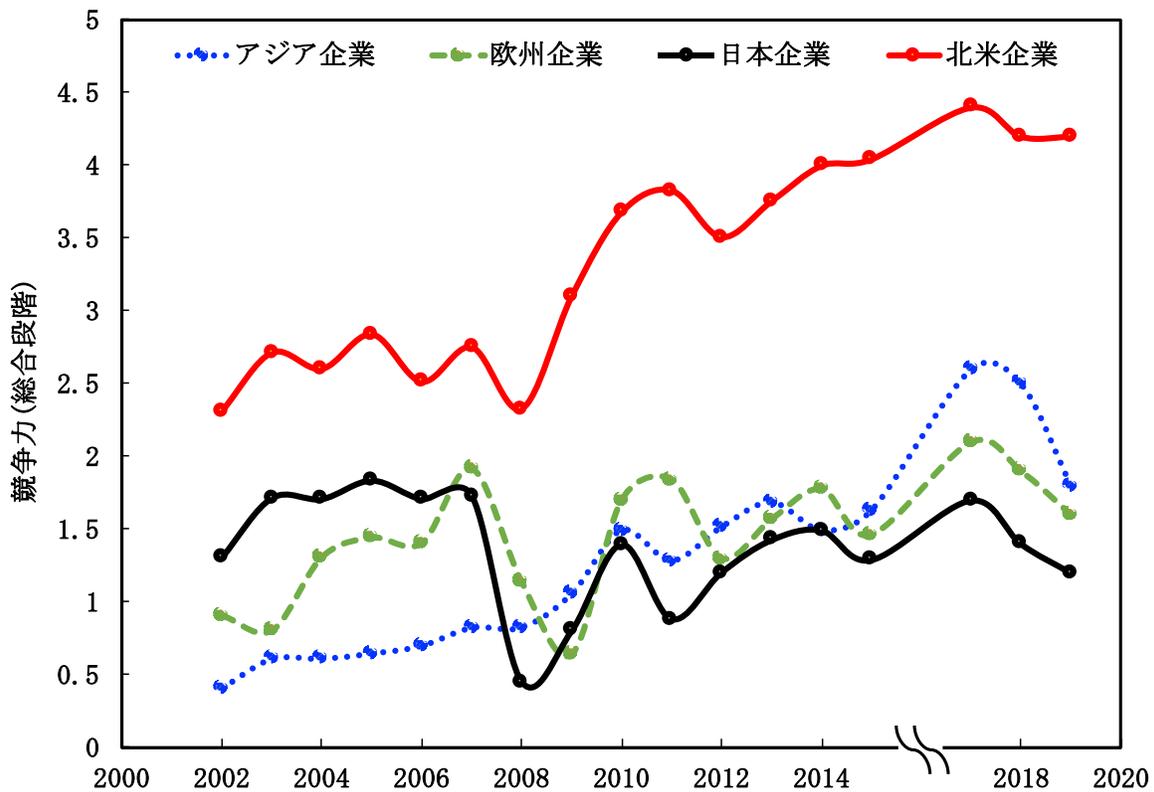
3. ものづくり状況の変化

製造業は、国内雇用や貿易立国日本を支えてきた日本経済の基幹産業である。しかし、日本の製造業は、以前とは異なり衰退を見せつつある。1990年代以後、日本経済がバブル崩壊後の長い低迷から脱却できずにいる中、我が国が得意としてきた「高品質・高性能なものづくり」に支えられた競争力に対して、低コストで生産ができる新興国の台頭や、製品のコモディティ化によって、激しい価格競争が引き起こされる等、我が国の製造業を取り巻く環境が大きく変わってきた（表 3.1）。特に、大量生産型で商品サイクルが早い家電などコンシューマー製品の分野で大きな打撃を受けている。また、日米欧アジアにおける機械産業の国際競争力の推移を図 3.1 に示すが、2008年のリーマンショック以降、日本企業の国際競争力はほぼ最下位になっている。

表 3.1 国内外の環境変化に伴う我が国ものづくり産業の変化

年代	日本の経済成長率* (平均)	世界の経済成長率 (平均)	最終製品 (例:空調)	部品・装置	外部環境
1970年代	5.2%	4.1%	国内での開発・生産が中心+輸出の拡大	<ul style="list-style-type: none"> 最終製品の国内生産向けを中心に生産 海外展開が進む中で、主要部品を日本から輸出、現地で組み立て 	
1980年代	4.4%	3.4%	内需と輸出の拡大 (ノックダウン生産)		
1990年代	1.5%	3.4%	内需の頭打ち輸出の拡大 + 市場最寄化生産の拡大 (生産移管設計)	<ul style="list-style-type: none"> 最終製品の海外展開が進む中で、地域ニーズをつかめるようにノックダウン生産 	
2000年代	0.6%	3.8%	国内生産の減少 (内需と輸出の減少) + 市場最寄化生産の拡大 (アレンジ商品開発)	<ul style="list-style-type: none"> 部品などの現地調達化 最終製品メーカーに追従して徐々に海外展開が進行 	
2010年代	1.3%	3.8%	国内生産の減少 (内需と輸出の減少) + 市場最寄化生産・開発強化 (独自商品開発)		
2020年	-4.8%	3.6%	市場最寄化生産・開発強化 (独自商品開発)		

*経済産業省 ものづくり白書のデータより作図



出典：日米欧アジア機械産業の国際競争力の現状（日本機械輸出組合）
総合段階での国際競争力の推移のデータより作図

図 3.1 2002～2019 年度日米欧アジア機械産業の国際競争力の推移 (*2017 年度の情報は無い)
(国際競争力=「収益率 (売上高営業利益率) ×世界シェア (売上高シェア) ×100」)

さらには、人々の価値観の変化、持続可能性問題の重大化、世界的な Digital Transformation (DX) の展開とデジタル技術の発展、プラットフォームの支配、新興国市場の拡大などの急激な変化について行けなくなりつつある。ドイツの“インダストリー4.0”、アメリカの“スマート製造(SMLC)”、中国の“製造2025”など、世界の主要各国はそれぞれの明確な旗を立て、産業における第四次産業革命への対応を進めてきている。一方、日本では、目指す“社会の姿”としての“Society5.0”を打ち出しているものの、目指す“産業の姿”に関する明確な旗印を決めないまま政策を進めてきた。

本章では、2 章で作成した課題樹形図の中の主要な支配的要因についてその概要と変化のトレンドを整理する。具体的には、「社会課題」における主要な要因と「解決方法」における主要な要因を取り上げる。

3.1. 社会課題の主要要因

3.1.1. 環境的 Sustainability

Sustainability の概念は、Sustainable Development Goals(SDGs)[1]が示すように、貧困や飢餓の解消、Diversity と Inclusion、水、地球温暖化防止、持続可能な消費と生産など様々なものを含んでおり、SDGs がその最大領域を示すと言って良い。Triple Bottom Line、すなわち、環境的 Sustainability、社会的 Sustainability、経済的 Sustainability というまとめかたをされることも多い。かつてはこの3つの共通部分集合、つまり、3つが全て成立した状態が Sustainable な状態と言われていたが、現在、これらは独立ではなく、むしろ図 3.2 に示すように、環境的 Sustainability(図では Earth's Life Support System)が成立することが全ての前提であり、その中で、社会的 Sustainability が成立し、なおかつその中で経済的 Sustainability が成立することが Sustainable な状態であると理解されている。本白書の主題である製造業は、その経済的 Sustainability が成立して初めて成り立ちうるものである。

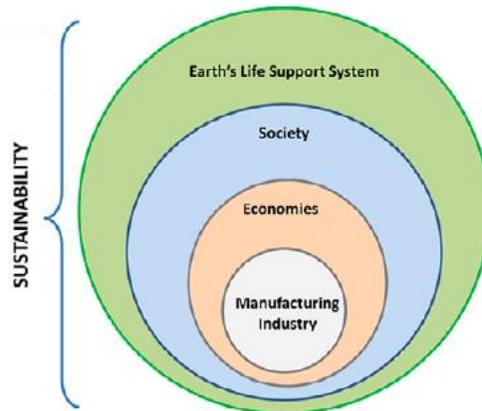


図 3.2 Sustainability の概念[2]

本節では環境的 Sustainability に焦点を当てる。製造業に関係の深い環境的 Sustainability の主要な要素は、カーボンニュートラル、サーキュラー・エコノミー、生物多様性、オゾンホール、およびそれらの原因となる

有害物質管理ということになるであろう。そもそも、1992 年の人工物工学研究センター発足当時から提唱されているように「有限性仮説」[3]に基づけば、大量生産・大量廃棄を駆動する製造業は、Sustainability 問題の諸悪の根源である。逆に言えば、大量生産・大量廃棄を止めれば Sustainability 達成に大きく近づくという意味で、製造業が Sustainability 達成に向けた最大の成功要因でもある。従って、本白書の目指すものづくりは、Sustainability を達成する、具体的に言えば、カーボンニュートラル、サーキュラー・エコノミー、および、種々の有害物質管理を達成するものづくりである。そして、サーキュラー・エコノミー[4]に代表されるように、欧州は、この Sustainability への対応を企業競争力に結びつけようとする政策を強力に推進している。またこれと表裏一体の関係で、カーボンプライシングに代表されるように環境面での外部不経済を経済メカニズムの中に取り込もうとする動きがさらに進展すると予想される。

欧州では 2015 年頃から、我が国においても 2020 年頃から、企業経営の中心に Sustainability を含めることが必要条件になってきている。環境的 Sustainability は飽くまで 1 つの表象に過ぎず、社会規範、倫理、社会的 Sustainability への対応などが企業価値に直結する時代になってきている。環境的 Sustainability に関しては 3 つの特徴で整理することができる。第一に、従来のように生産など本業の部分はそのままで、環境部門が CSR 活動を行うことでお茶を濁すことは通用せず、生産、販売、間接部門など企業の中のあらゆる活動、全ての社員に Sustainability を浸透させ、それを念頭に置いた行動を常にとること。第二に、Absolute Sustainability、すなわち、絶対量で測る Sustainability という言葉に代表されるように、省エネ、できるだけリサイクルといったような漸進主義、改善的アプローチではだめで、持続可能な社会を実現するために必要な絶対目標を達成するために必要な行動を取らなければいけない。これは、2050 年までに温暖化ガス排出を実質ゼロにするカーボンニュートラルに典型的に現れている。そして第三に、顧客、社員、関係者を結集させる経営である。これには、Sustainable なものづくりを将来達成することを、納得感を持って示すビジョンの提示であり、顧客、社会、関係者と Sustainability の意義を共有するパーパス経営が必須である。

これら 3 つの指針の下での Sustainable なものづくりの鍵は以下の 2 つである。1 つは、サーキュラー・エコノミー[4]がその典型例であるが、ビジネスモデルの転換であり、大量生産・大量廃棄のリニアエコノミー型のビジネスモデルから、資源が循環すること、ゼロカーボンを前提に顧客に価値を提供するビジネスモデルへの転換が必須である。2 つ目は、資源循環とゼロカーボンを実現するための、ライフサイクル全体での見える化とライフサイクルのあらゆる段階で資源・エネルギー消費、廃棄物排出を 1 桁下げるドラスティックな lean 化である。これらを統合的に実現する手段が、ライフサイクル思考、ものからことへの流れを捉えた、製品サービスシステム(PSS)、X-as-a-Service (XaaS)、シェアリング、サブスクなどを含めた柔軟なビジネスモデル設計、製品ライフサイクル設計とマネジメントであり、これを実現するキーテクノロジーが、ライフサイクルの全ての段階でのあらゆる側面の基礎体力としてのいわゆる技術力であり、それに加えて、ライフサイクル全般にわたるデジタル化と、製品アーキテクチャと製品ライフサイクルのアーキテクチャを統合した次世代ものづくりアーキテクチャの設計力である。

【参考文献】

- [1] SDGs とは?, <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>.
- [2] M. Z Hauschild, S. Kara, and I. Røpke: "Absolute sustainability: Challenges to life cycle engineering," CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 69, No. 2, pp. 533-553, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.004>
- [3] 吉川弘之: "人工物工学の提唱," ILLUME (東京電力), Vol. 4, No. 1, pp.41-56, 1992.
- [4] 梅田靖, 21 世紀政策研究所 (編著): サークュラーエコノミー ～循環経済がビジネスを変える, 勁草書房, 2021.

3.1.2. 提供価値

これまでの日本の製造業は競争力の源泉である「高品質・高性能なものづくり」を確立することに多大なる力を注いできた。そこでは、製品の価値を品質と性能に見出し、高い品質と性能を実現しながらコストを削減するといった努力が注力された。その結果、1980 年から 1990 年は世界一の品質と性能を有する製品を安価に世界中に提供することができた。しかしながら 1990 年以降はそのような価値提供のビジネスモデルが上手く機能しなくなってきた。製品の高い品質と性能を実現する技術は標準化されて拡散し、コストの削減は製

造業のグローバル化に伴って低賃金で生産できる地域、途上国へとシフトされ、日本における製造業の空洞化の危機が叫ばれることとなった。このようなものづくりの危機が叫ばれて 30 年以上も経過した日本のものづくりにおいて、根本的な解決策の実現には未だに苦労している現実がある。

ものづくりにおける価値を提供する形態の変革が期待される中で、顧客（市場）が要求する価値の内容の変化への対応が重視された。これは、顧客は製品（もの）を購入するのではなく、使用（サービス）に対価を払う形態への変化である。製品自体が価値であった時代における「もの」を交換する（販売する）ことによる交換価値の形態から、製品の使用によって得られる価値として使用価値、経験価値への変化である。

（1）サービス経済化とサービス価値化

このような提供価値の変化があるにもかかわらず、日本の製造業は交換価値に囚われた古いビジネスモデルのままであり、使用価値、経験価値を提供することができる製品とその製品を媒体とするサービスモデルの構築が遅れているのが実態である。このような状況に危機感を感じ、延岡ら[5]は製造業の価値創成モデルとしてサービス経済化とサービス価値化の必要性を指摘している。

➤ サービス経済化：事業形態として製造業からサービス業へ移る変化

顧客は製品を購入する交換価値を求めるのではなく、使用（サービス）に対価を払う形態への変化である。この変化に対応するためには、交換価値だけを実現してきた製造システム中心のものづくりを見直し、顧客との接点における新たな価値を創成するサービスを実現するシステムが必要となる。

➤ サービス価値化：製品の顧客価値として「もの」の価値から無形の価値へ変わる変化

有名な話として Apple 社は iPhone の売り上げによって莫大な収益を挙げているが、iPhone 単体ではその収益は実現できない。「価値 = iPhone + Apple Music/App Store」で説明できるように、Apple Music/App Store のサービスを提供するソフトによって iPhone はそのサービスを提供するデバイスとなり、顧客へ使用価値や経験価値を提供できるシステムとして確立された。この価値提供は、顧客が製品を使用、経験する接点において実現される。

以上のサービス経済化とサービス価値化は相乗効果によって価値が増幅される。ものとしての製品の物理的な仕組みによって実現される性能／機能によって価値が提供されると同時に、その価値に無形のサービスが価値として融合され、総合的な価値が顧客に提供される。このような価値創成の形態は PSS（Product Service System）として概念化され、多くの成功事例が報告されている。

（２）ものづくりのビジネスモデルにおける価値の創成

ここで今一度、ものづくりのビジネスモデルにおける価値の創成について考えてみる。ものづくりには様々なテイクホルダ／システムが関与し、それらのシステム間の接点において価値が創成されると整理できる。例えば、下記に示すような接点で価値が創成される。

➤ 市場（顧客）システムと製品システムの接点で創成される価値：サービス価値

製品が提供する性能／機能の価値と市場（顧客）が要求する使用価値や経験価値を融合させることによって総合的価値であるサービス価値が創成される。サービス価値は、顧客の多様性を考慮した個別化が重要であり、シェアリング、サブスク、メンテナンスなどの多種のビジネスモデルの創成が必要とされる。多種のサービス価値を創成するためには、顧客の情報と顧客に関する知識が重要である。

➤ 生産財（工場など）システムと製品システムの接点で創成される価値：経済価値

製品を製造する工場は生産財システムであり、材料から部品を作り出す加工設備や、部品から製品へと仕上げる組立設備などが複雑に組合わされてものづくりを実現している。これらの生産財システムを設計するためには製品の情報が不可欠であり、加工や組立に関するエンジニアリング知識が重要である。また多様な顧客に対応しながらもコスト削減などの経済価値を創成するためには、生産財と製品の適切な組合せが重要であり、その接点は重要な役割を担う。この接点においては、工場リソース、エンジニアリング組織／工程と製品のインタラクションを効率化する生産財や製品のプラットフォーム化、モジュール化が着目されている。

➤ ライフサイクルシステムと製品システムの接点で創成される価値：ビジネス価値

製品のサプライチェーンは、生産財システムの製造だけでなく調達、物流、施工、サービスなどの製品ライフサイクルにおける多様な機能を有する企業のビジネスによって実現される。これらの企業の連携をライフサイクルシステムと呼ぶと、ライフサイクルシステムと製品システムの接点で創成される価値は、ライフサイクルシステムとの連携であるビジネスの価値が創成されると理解できる。このビジネスを実現するためにはライフサイクルシステムの情報が重要となる。生産財（ダイキン）と製品の接点が生み出す経済価値を最大化するためにはビジネスの最適化、つまりサプライチェーンの最適化が必要となる。サプライチェーンでのカップリングポイントのデザインにおいては、マーケットの変化に応じたプラットフォーム化、モジュール化を適切にデザインする必要があり、また、災害発生によるリスクマネジメント、レジリエンス能力を向上させるためには、ライフサイクルシステムの柔軟性が要求される。

➤ **地球／社会システムと製品システムの接点で創成される価値：環境価値**

製品のライフサイクルにおいては、様々な資源とエネルギーが消費される。世界的な資源の枯渇問題、エネルギー消費が関係する温暖化ガスの削減問題を考慮することは重要課題である。このような地球環境を配慮する価値である環境価値は、地球／社会システムと製品システムの接点で創成される。また、この価値は、サービス価値、経済価値、ビジネス価値を最大化する上での制約条件となることが特徴であり、これらの価値を考慮した価値の評価が重要課題である。

以上のように、異なる領域のシステム間に存在する接点におけるインタラクションによって価値が創成される。

【参考文献】

- [5] 延岡健太郎：製造業における「サービス価値」の創出，サービソロジー，Vol.3，No.3，pp.4-11，2016/10

3.1.3. Diversity と Inclusion

本節では、近年の企業経営に欠かせない Diversity（多様性）と Inclusion（包括性）について述べ、ものづくり企業が社員向けにそれをどう実現していくべきか、さらにカーボンニュートラル・SDGs に代表される社会課題解決、Society5.0 に代表される未来社会像へどのように貢献していくべきかを述べる。

Diversity は、一人一人が違うこと、すなわち「多様性」を受容する考えとしてアメリカで生まれ、年齢、国籍などの表面的なものから、ジェンダー、価値観などの内面的なものに至るまで、個人の違いを積極的に認め合おうという思想である。これに対し、Inclusion は、多様な人々の特性や力を最大限に活かされた集合体が発現されている状態、すなわち「包括性」を意味する。Diversity のみでは、企業をはじめとする組織体の持続性が担保されないことから Inclusion と対で、D&I と称されることが多い。日本では 2012 年に経済産業省が「ダイバーシティ経営企業 100 選」を発信して以降注目されるようになり、様々な企業が女性管理職登用や障害者雇用を促進するなど、D&I の理念を意識している。

ものづくり企業において、少子高齢化の背景の中で、開発現場や生産現場における時間的・身体的な、様々な労働のあり方を実現する必要がある、そのための Diversity として、各社員個人の価値観に対する「働きがい」を実現することが重要である。一方、それを実現する Inclusion として、様々な社員が一体となって企業活動を行うために「企業価値」を高める必要がある、その手法として、たとえば企業内カーボンニュートラルや DX 技術を用いたスマートラボ化・スマートファクトリ化などが挙げられる。



図 3.3 ものづくり企業が組織内で実現する D&I と社会に対して貢献する D&I

上述の D&I は、その起源に引っ張られた企業内向けの取り組みである。しかし、SDGs やカーボンニュートラルのような世界課題がきっかけで、企業活動の目的が、ビジネスから社会貢献にシフトしつつある中で、企業が社会の D&I にどう貢献できるか今後は意識すべきである。ただし、実行はこれまでもなされてきた。ユニバーサルデザインや個人化設計など、多様化する顧客ニーズにこたえるための「カスタマイズ」は、社会の Diversity に対する対応策の一つと言える。一方、社会の Inclusion とは、企業体ではなく顧客個人が所属する組織体、すなわち自治体、国家、世界レベルでの包括性を意味する。これに対しても、その企業が提供する商品で、その組織体の包括性を実現していると言っても過言ではない。すなわち「商品価値」を高めることが、ものづくり企業が社会に対して貢献可能な対応策と言える。

3.1.4. ものづくりにおける知識や技能の伝承の危機

本節では、日本のものづくりにおいて、これまでに培ってきた知識や技能を後世に伝承し「日本にもものづくりを残す」にはどうすればよいかを考えていく。先に述べてしまうと、ヒトと機械の協業（Human-Machine Teaming）をキーワードに、AI・ロボット技術を駆使してより高度なものづくりを我々が目指す限りにおいて、日本のものづくりは進化し続けるものと結論づけたい。本結論に至る過程を以下に述べる。

（1）知識や技能のデジタル化と自動化の流れ

ものづくりの現場で熟練者が習得してきた知識・技能のデジタル化は順調に進んでいる。特に人やモノを測定してデジタル化するためのセンシング技術の発達、および、それらセンサから得られる膨大なデータを処理するための計算機リソースの充実、そしてデータ解析とモデル構築のための手法の研究開発も盛んに行われている。

AI 技術に代表される計算技術を用いて知識や技能をモデル化し、そのモデルを実装したロボットなどのシステムがヒトに成り代わって作業を行う、この自動化の流れもデジタル化に平行して推進されている。とくに製造業においては、外観検査工程の自動化が積極的にすすめられている。これは、近年目覚ましい展開をみせる深層学習法が、センシングにより得られる画像データ解析のタスクに高い性能を発揮することが背景にある。その

ほか、切削加工における加工条件や工具の選定をはじめとして、プレス金型のスプリングバック補正・ダイカストや射出成型の金型の凝固収縮補正、劣化型の修復、溶接など、現場の熟練者の知識・技能に頼っていた様々な場面において、デジタル技術の活用と自動化が模索され、推進されている。

（２）自動化の限界点とヒトと機械の協業の必要性

ここで、製造業において要求される自動化への性能について考える。例えば、製品の欠陥検査システムにおいて、期待される欠陥検出性能は 100%が基本であるが、たとえ最新の AI 技術を駆使したとしても一般的には 100%を保証することは難しい。そのため、自動検査は欠陥品のスクリーニングに用いられていることが多いが、それでは単にシステムの検出漏れをヒトが見つかるということになり、ヒトの作業量の低減への貢献はあるが、それ以上の恩恵は望めない。システムの設計としては、機械システムがヒトをサポートする一方向のみでなく、同時にヒトが機械へティーチングするような仕組みを盛り込んで、機械システムの性能を向上させていくことが重要であると考えられる。

上記の議論は製品検査を中心に行ったが、ものづくりにおける知識や技能は、そのほか設計法・製造法をはじめとして多岐にわたっている。それらに対して統一的な議論を行うことは簡単ではないが、「ヒトと機械の協業」をベースとして考え、新たな知識や技能を生み出すためにデジタル化・自動化技術を活用し、同時にそれらを機械システムへ実装し再現していくことを繰り返すことにより、ものづくりの高度化を実践し続けていく必要がある。

3.1.5. 市場の変化

米中間の経済貿易摩擦や各国による保護主義的行動、新型コロナウイルス感染症等によって、グローバル市場は不確実性が高まっている。また、グローバル・サプライチェーンは、不確実性に対して脆弱であることが顕在化してきている（図 3.4）。このような状況の下で、貿易自由化の枠組みが模索されてきた。地域包括的経済連携（RCEP）の署名により、東アジア三大経済国 15 か国が参加する RCEP は 2022 年 1 月 1 日に 10 か国で発行し、残り 5 か国も順次適用対象となる見込みである。また、日中韓自由貿易協定（FTA）については交渉が進められているとともに、対外開放のレベルを全面的に引き上げ、貿易・投資の自由化・円滑化を推進し、商品および要素の開放を持続的に深化させ、ルール・規制・管理・標準等の開放を着実に進めていく。日 EU・EPA（経済連携協定）といった複数国間の、現在 WTO が規定する以上の内容（WTO プラス）を含む協定も締結されてきている。したがって、長期的には、自由貿易は深まり、拡大してゆき、将来の国際自由貿易は今後も進展すると予想される。国際市場が未来の道である。

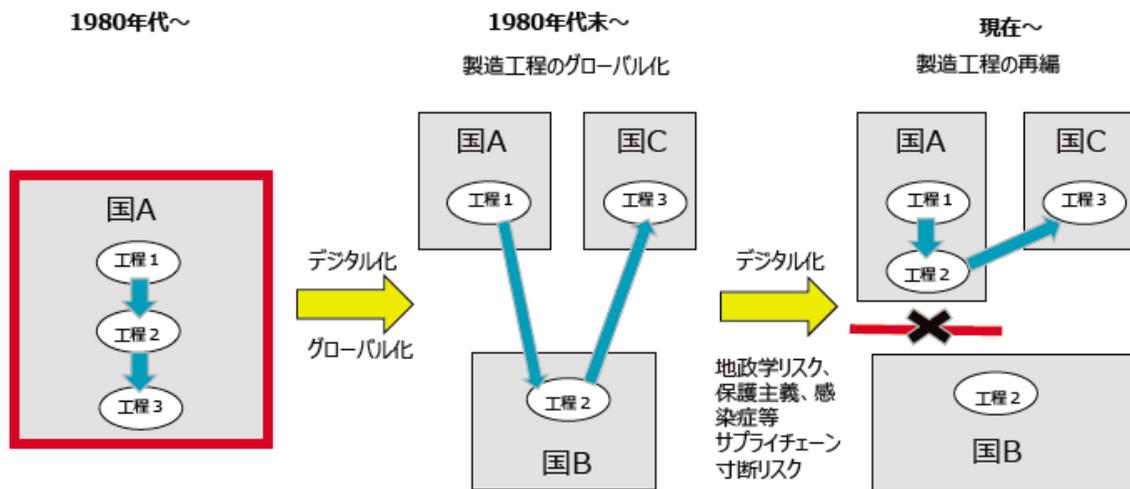
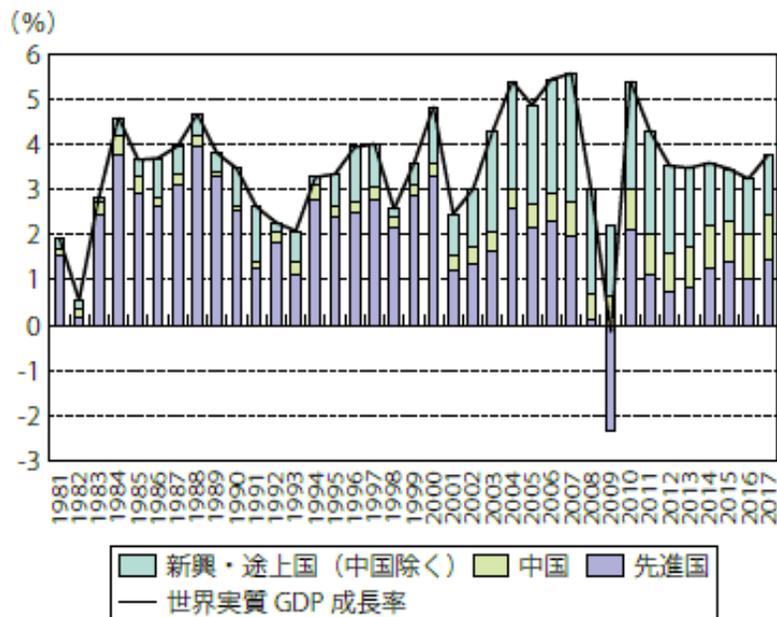


図 3.4 サプライチェーン再編の歴史[6]

新興国・途上国の経済成長が目覚ましく、その実質 GDP 成長率は先進国を大きく上回っている。図 3.5 は今後も先進国を上回る見込みであることを示している。国際通貨基金（IMF）の調査から、2017 年に新興国・途上国のシェアは 40%を超える水準に達していることがわかる[7]。このトレンドを延長すれば、2030

年代末までに新興国・途上国の経済規模は先進国に追いつき、追い越すことになる可能性がある。加えて、わが国において人口減少と少子高齢化が進むなかで、国内市場に大幅な拡大が見込めないため、新興国・途上国市場の開拓と確保が不可欠であると広く認識されている。新興国の製造業はローエンド製造業からミドルレンジとハイエンドの製造業へと徐々に発展しており、先進国も新興国に投資することが多く見られている（図 3.6）。供給面では、新興国では、製造業において企業間で激しい競争が繰り広げられる。需要面では、新興国の豊富な労働人口は、消費の担い手としても経済成長の原動力になる。GDP の上昇とともに購買力が高まるが、新興国の消費者は購買経験が少なく、ブランドや製品の機能・性能に関する情報が乏しい。グローバル展開の際には、地域やセクターによる違いを深く理解するとともに、製品の機能や性能の設計は、現地の需要や文化に対応することが求められる。消費者ニーズの違いが製品の位置付けにも影響を与える。たとえば、先進国の消費者は製品の付加特性とブランドの付加価値を重視する可能性があるが、新興国の消費者は製品の基本的な特性、ブランド認知度、製品のコストパフォーマンスに注意を向ける。



備考：各国・地域の寄与度は、前年の名目 GDP に占めるウェイトに基づいた試算値。
 資料：IMF “World Economic Outlook, April 2018” データベースから経済産業省作成。

図 3.5 世界の実質 GDP 成長率の推移（国・地域別寄与度） [7]

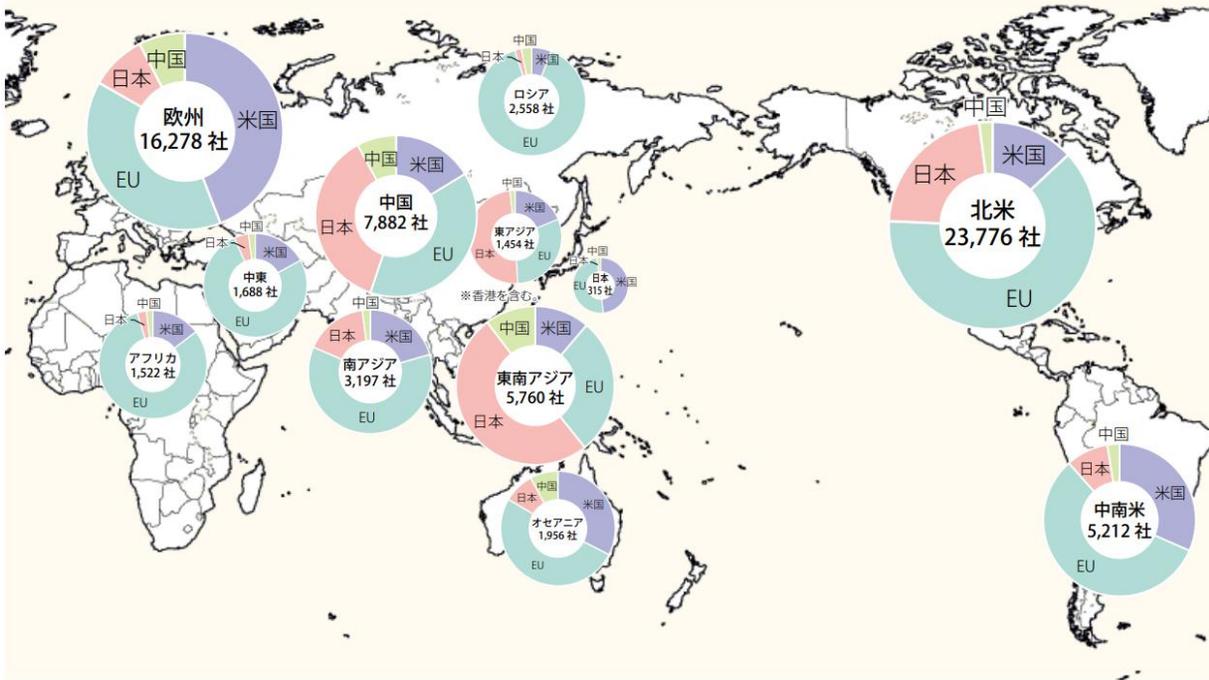


図 3.6 日米中・EU 企業が出資（25% 以上）する海外企業の分布（製造業） [8]

日本の製造業に関しては、東南アジア、東アジア、中国・台湾に対しては他国に比べても数多く進出しているといえるが、それ以外の地域においては存在感が大きい[8]。もちろん、国内ビジネスの活性化が重要であり、同時に、引き続き、グローバルにビジネスを拡大する可能性を検討すべきである。

【参考文献】

- [6] 経済産業省ものづくり白書 2020
- [7] 経済産業省通商白書 2018
- [8] 経済産業省通商白書 2019

3.2. 解決手法における主要要因

3.2.1. 研究開発と設計開発のデジタル化

研究開発と設計開発におけるデジタル技術活用は、デジタルエンジニアリングとして今や広く世の中に普及しており、一般的には計算機援用システムである CAD（設計） / CAE（解析） / CAM（加工） / CAT（検査） を活用したものづくり手法を指している。かつては、設計者が CAD で製品を設計、解析部門で CAE によりシミュレーションで性能を評価、設計が固まった後は CAM で製造を行い、最後に CAT で形状計測して検査する、といった設計から製造への流れが一般的であった。比して、今日においては製造された現物の形状をスキャニングしてデジタル化し、設計へフィードバックを行うリバーシブルエンジニアリング技術も普及しており、デジタルと現物の融合が進んでいる。3D スキャン技術に加えて、AM（付加製造）技術も設計開発のデジタル化を論じる上で重要である。AM により、切削や型を使った加工法では製造が難しい形状が製造できるようになってきており、形状設計の幅が広がってきている。特に、CAE による解析結果を CAD 上の形状にフィードバックし形状を最適化するジェネレーティブデザイン（トポロジー最適化技術など）は古くから研究されてきたが、AM との相性の良さにより急速に普及している。CAM においても、クラシカルには切削加工の工具パスの生成が主な用途であったが、今日では AM におけるレーザーやノズルのパス生成も担っている。また、形状計測システムを加工機に組み込み、計測結果をダイレクトに加工にフィードバックするシステムも存在している。

本節では、特に現物のデジタル化が設計開発にどのように貢献するかを述べ、今後どのように発展させていくべきかを考える。ここで、対象が部品単体か、部品が組み合わされたアセンブリ品かで大きく状況が異なるため、それぞれに関して以下に述べる。

（1）部品単体レベルでのデジタル化技術応用

三次元測定機を用いた接触式測定による寸法検査は、その精度の高さからデファクトであるが、一部の寸法検査は光学式スキャナ・CT スキャナに置き換わっている。測定物の形状を広範囲にデジタル化し、様々な箇所の寸法計算を CAT 上で一括して行うことで、検査時間を大幅に短縮でき、加えて接触式では測定が難

しい箇所でもアクセスできることがメリットである。特に CT スキャンは X 線の透過により測定を行うため、外から見ることができない箇所もデジタル化でき、AM 製品など複雑なトポロジーを持つ形状にも有効である。

上記の寸法検査で得られる設計形状と実形状の差は、製造プロセスで発生する誤差となる。その誤差を考慮して設計形状を修正し、製造の精度を向上させることも、一般的になりつつある。特に成型後の加工が一般的でないプレスや射出成型においては、金型修正のための技術を実装した市販ソフトウェアも登場している。

部品の構造シミュレーションにおいては、CAD 上の設計形状ではなく、デジタル化された実物の形状を入力として用いることで、より現実に近い解析結果を得ることが可能となってきた。ただし、シミュレーションを走らせるためには有限要素メッシュが必要となり、そのデータ作成に多大な工数が必要となる点は課題として残っている。

(2) アセンブリ品レベルでのデジタル化技術応用

上記の通り、部品レベルにおけるデジタル化技術の活用は一般的になってきた。次は、製品全体または半製品レベルへの応用となる。期待される応用先は、組み立て精度の確認をはじめとして、アセンブリ状態でのシミュレーション、ベンチマーキングなどが挙げられる。デジタル化の際には、アセンブリ前の部品を個別に測定し、計算機上で組み立てを行うことも考えられる。しかし、組み立て時にねじなどの締め付けにより変形が発生する部品も少なくないため、可能な限りアセンブリ状態での測定を実施する必要がある。逆に、設計サイドでは、その変形量を測定し、それを見込んで寸法を決めていくことも必要となってきた。

アセンブリ品をデジタル化しそれを活用していく際、測定技術・データ処理技術どちらに関しても、ほとんどのケースにおいて、部品単体を扱う手法をそのまま適用することはできない。例として、図 3.7 中の「測定によるデジタル化」では量産されている製品のバラツキを調べる目的で、X 線 CT スキャンでデジタル化した例である。現状において最も普及している光学式のスキャナでは、製品内部の測定はできないため、CT を用いている。仮に光学式スキャナで測定する際には、製品を組み立てながら測定を行うなど、工夫が必要となる。また、データ処

理に関しても、測定データ上では部品の区別が存在しないため、部品のセグメンテーションを行う必要があり、研究開発が現在進行している分野である。

アセンブリ品レベルでの実製品のデジタル化とその活用が進めば、ものづくりの基盤となる設計・製造・測定の3技術の連携がより強固となっていくことが予測される。下図はそのイメージである。特に、量産品から得られる実寸法情報を設計データへ融合していくことで、製造方法や生じる誤差などを設計モデルに反映し、モデルの精度を高めることも可能であると思われる。

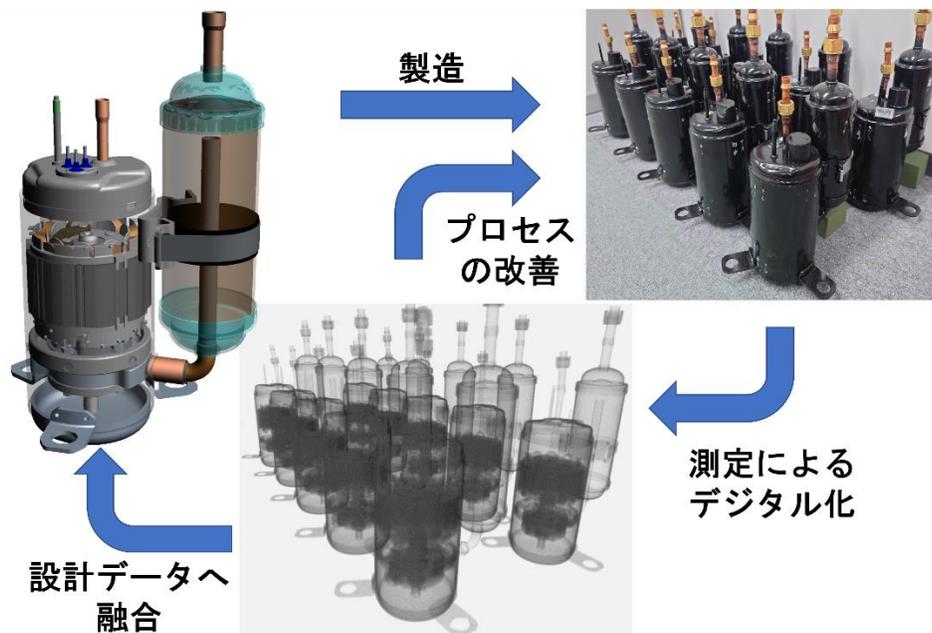


図 3.7 デジタル化による設計・製造・測定の3技術の連携のイメージ
(図中の製品はエアコン室外機に搭載されている圧縮機)

3.2.2. 製造工程のデジタル化

ロボットやAI（人工知能）、IoT（モノのインターネット化）などの先進技術は、日々著しい進化を遂げており、2017年3月に我が国の産業が目指すべき姿として“Connected Industries（コネクテッドインダストリーズ）”というコンセプトが提唱された。“Connected Industries”とは、データを介して、機械、技術、人など様々なものがつながることで、新たな付加価値創出と社会課題の解決を目指す産業の在り方である[9]。

製造工程におけるデジタル技術活用は、システムやロボット、IoT 機器などの技術を応用し、研究開発－製品設計－工程設計－生産のエンジニアリングチェーン(EC)全体を改善して生産性を向上させる。前節では研究開発－製品設計のデジタル化を述べたが、本節では、特に工場のデジタル化が工程設計と生産にどのように貢献するかを述べ、未来工場(図 3.8)の姿を描く。

(1) 工程設計のデジタル化技術応用

顧客の価値観の変化に対応するマスカスタマイゼーションのコアの一つは、工程設計の柔軟化である。マスカスタマイゼーションを実現するためには、「受注に合わせて柔軟に生産ラインを変更し、効率的な生産を行えるようにする」ことが前提となる。図 3.8 に示したアダプティブマシンは、リニア搬送テクノロジーと IoT や ICT などのデジタル化技術を活用する。独立制御されたシャトルによって、工場の生産状況を自動判断することで、生産性を損なうことなくその場で製品レシピを変更することが可能となる。さらに、モジュラー設計とデジタルツイン型の生産システムを使用すれば、新しい操作をリアルタイムでシミュレートすることによって、ダイナミックセル生産ラインを簡単に再構成し、マスカスタマイゼーション生産を実現することも可能となる。また、5G などの無線技術は、工程設計の柔軟化を通じてダイナミック・ケイパビリティの強化に資するとともに、遠隔からリアルタイムでの指示を支援することで、技能者不足に対応することが期待される。

(2) 生産のデジタル化技術応用

生産性向上に向けた取組みの中で、多種多様な現場データを集約して現実世界のレプリカをデジタル空間上に再現し、AI やシミュレーションにより現場改善につなげるデジタルツインコンセプトが注目されている。デジタルツインは、IoT や AI、AR (Augmented Reality) などの技術を用いて仮想空間に物理空間の環境を再現し、あらゆるシミュレートを行い、将来を予測する新しい技術である。ここで、生産現場にデジタルツインを導入する取り組みに関して、加工－設備－生産システムの視点から述べる。

➤ 加工最適化・加工効率化

現場力や NC データの品質によって加工時間・加工品の品質が大きく左右される。そのため、機械加工のデジタルツインでは、工具、加工素材、治具だけでなく、工作機械本体の物理特性までもデ

デジタル上で構築し、加工時の切削力や工具振動などの切削状態や面品位などを確認する。また、解析データの活用が進めば、最適な加工条件を自動的に提供することも期待される。

➤ **製造設備の故障予知保全**

設備異常の早期発見によって計画的に修理を実施し、故障を未然に防ぐことが可能となる。そのため、「製造設備の情報をセンシングし、通信機能によりその情報を収集する」稼働監視に必要な要素技術が現在開発されている。ビッグデータ分析や、深層学習（ディープラーニング）などの AI 関連技術を活用すれば、リアルタイムでの予知保全も対応可能となる。

➤ **生産システムの全体最適化**

生産現場のデジタルツインを通して、生産リードタイム、稼働率、時間、コストなどの指標に対してシステムを最適化し、生産性の高い生産計画を決定することが可能となる。さらに、工場全体のデジタルツインを構築することで、一気通貫の生産の流れを実現し、工場全体で成果を上げる全体最適化も可能となる。



図 3.8 未来工場[9]

【参考文献】

[9] <https://www.digital-transformation-real.com/blog/smart-factory-of-microsoft.html>

3.2.3. デジタルトリプレット、製品ライフサイクルのデジタル化

ここまで見てきた、設計開発のデジタル化、製造工程のデジタル化は、インダストリー4.0 の流れを汲む、欧州流のデジタル化と行うことができる。インダストリー4.0 のオリジナルの発想は、デジタル化による自動化により、省人化によるコスト削減と、柔軟化による多品種少量生産による付加価値向上にあった。

日本型ものづくりの強みは、エンジニアと現場の作業者が協力して、生産システム、生産工程をカイゼンし続け、生産するものの品質と生産システムの品質（ムダの排除を含む）を常に向上させ続けることにある。このような観点はインダストリー4.0 にはないものであり、デジタル化された生産システムを人の知恵により常にカイゼンし続けるというのがあるべき今後の日本型生産システムと行うことができる。これを実現する枠組みとして「デジタルトリプレット」（図 3.9 参照）を提案している。インダストリー4.0 で中心的な役割を担う Cyber Physical System (CPS)、もしくは、図にある物理世界と情報世界からなるデジタルツインに知的活動世界を加えたものがデジタルトリプレットである。知的活動世界では、作業者や技術者が、デジタルツインを活用しながら、生産システム的设计、構築、立ち上げ、運用、カイゼン、保全などあらゆる活動を実施し、価値を産み出す。図 3.9 について 1 つ補足すると、物理世界と情報世界間の接続も自明なものではなく、必要な問題解決とかけられるコストに応じて、物理世界から情報世界に収集する情報、逆に、情報世界から物理世界への制御も変わってくる。物理世界と情報世界とのインターフェースに、技術者による設計と運用が必要になる。

デジタルトリプレット研究において現在進捗しているのは、生産システムのカイゼンや保全を例題として、熟練の作業者や技術者が問題を解決するプロセス（これを「エンジニアリング・プロセス」と呼ぶ）を実施し、それをナレッジ・エンジニアが記録し、さらにそれを汎化して「汎化プロセスモデル」を作成し、この汎化プロセスモデルを非熟練者が学習しながら実行することによって知識獲得を行う一連のサイクルを実行する方法論の構築である。

ダイキン工業においては、生産システムのデジタル化が進展しているので、これをデジタルトリプレット化することが今後の重要な課題である。これにより、Cyber Physical Production System (CPPS)(デジタルツイン型の生産システム)をカイゼンなど種々の活動に活用し、生産システムの価値向上に結びつける方法論を構築

することが可能になり、さらに、それらの活動で必要なノウハウを体系化することが可能にある。これが、デジタルトリプレットで実現する DX である。別の言い方をすれば、DX の前後の記録が残り、方法論が明らかになり、DX のためのノウハウが体系化される。

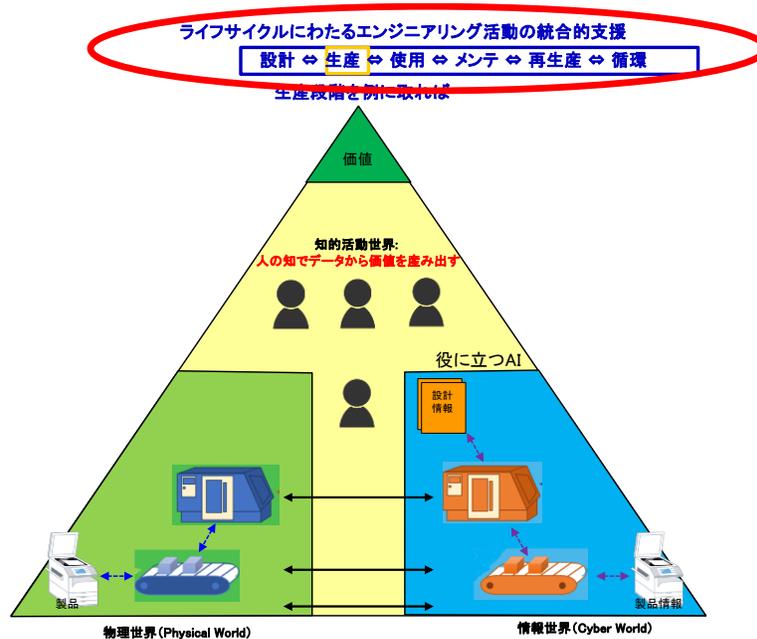


図 3.9 Digital Triplet

インダストリー4.0 流の生産システムの自動化のためのデジタル化は、完成された時点で進化が止まり、技術がその時点で凍結されるが、デジタルトリプレット型の DX は、人の力を活用して常に進化し続ける CPPS を設計、構築、運用することが可能になる。これを通じて、生産システムはどこまで自動化すべきか、自動化システムと人間の役割分担をどう考えれば良いか、などについて一定の答えを出すことが期待される。

さらに、3.1.1 節の Sustainability の項で述べたように、今後の脱大量生産・大量廃棄の大きな流れ、製品サービスシステム、XaaS による価値提供への転換を考慮にいれると、生産システムのデジタルトリプレットのみならず、製品ライフサイクルの全ての段階でのデジタル化、デジタルトリプレット化を通じた価値提供とそのビジネス化が必要不可欠となる。これは、生産システムにおいては、ハードウェアとしての生産システムと、生産知識、ノウハウを分離し、独立に扱うことを可能にするものであり、生産知識の価値化に繋がる。製造後の段階

においては、製品ライフサイクルの全段階をデジタル化することにより、製品の一生の個体管理を可能にし、ライフサイクルの各段階を跨がって情報を統合的に扱うことにより、使用や保全段階での個々の製品を常に最善の状態を利用することを可能にするとともに、ライフサイクルの各段階での資源・エネルギー消費量を一桁以上削減する飛躍的なリーン化を可能にする。さらに、デジタルトリプレット上で製品ライフサイクルの各段階、もしくは、各段階を跨がって、種々の問題解決を行うことが、製品サービスの付加価値を提供することにつながる。これらの製品ライフサイクルへ拡大するデジタルトリプレットはいまだ未開拓の課題であり、今後の研究が期待される。

本社会連携講座が展開する「次世代ものづくりアーキテクチャ」においては、生産段階でのデジタルトリプレットの組み込み、および、製品ライフサイクル方向へのデジタルトリプレットの展開が必要条件であり、これらを組み込んだ「アーキテクチャ」のデザインが求められる。

3.2.4. アーキテクチャとモジュール化

(1) システム構造としてのアーキテクチャ

アーキテクチャは、もともと建築分野の言葉であり建築様式のことを意味していたが、最近では情報システム分野で設計思想や構造を意味する言葉として盛んに使用され、システムの「見取り図」と表現される場合が多い。情報システムに限らず、アーキテクチャは複雑化するシステムのデザインやマネジメントにおける重要な概念として用いられることが増えている。複雑大規模化するシステムの諸問題に対処するための Systems Engineering の領域では、アーキテクチャは、「システムと外界（コンテキスト）との関係」や「システムを構成する要素とその要素間の関係」を意味すると解説されている[10]。

システムは多種多様な要素の集合体（結合体）であり、それらの要素の相互作用によって全体機能／目的が発現する総体である。この定義においてシステムのアーキテクチャは、構成する要素が作り出すシステムの構造と捉えることができる。構造という視点では、システムをネットワークとして捉えると理解しやすい。システムの構成要素を節点（ノード）とし、その節点間のつながりをリンクとするネットワークである。したがって、システム

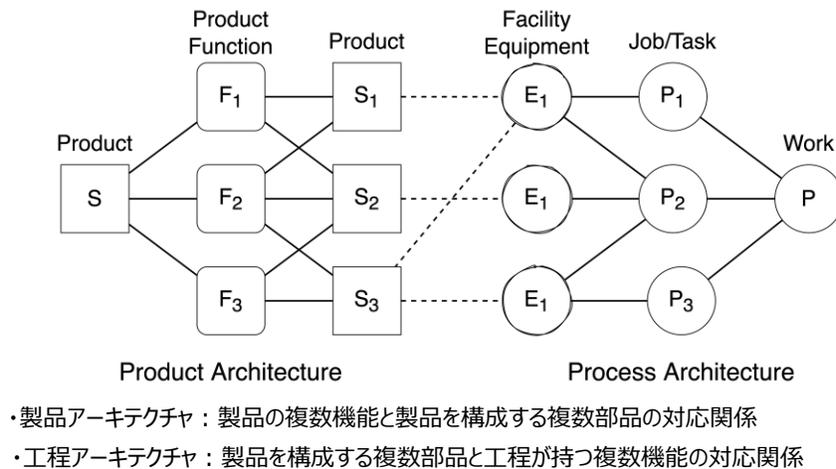


図 3.10 製品アーキテクチャと工程アーキテクチャ

の構造としてのアーキテクチャはネットワークの構造として捉えることができる。構造の種類としては階層構造があるが、要素間の相互作用（インタラクション）を実現する関係構造も重要な構造である。アーキテクチャが意味する構造は、階層構造だけでなく要素間の関係構造も含まれる。藤本は、ものづくりの生産システムにおけるアーキテクチャとして製品アーキテクチャや工程アーキテクチャなどを議論している[11]。

（２）モジュール：システムの複雑性を低減する構成要素

一方、アーキテクチャに併せて議論される概念としてモジュールがある。製品システムのモジュールとは、機能単位、交換可能な構成部分などを意味し、機器やシステムの一部を構成するひとまとまりの機能を持った塊として認識される。モジュールの概念は、複雑なシステムを整理、活用、運用する上で重要な役割を担うと期待される。例えば、複雑化されたシステムの構成要素を細分化されたレベルから一段上げるために複数の要素からなる塊を作り、設計対象、マネジメント対象としてモジュールを抽出する。これにより、設計や製造などの活動をモジュール単位で効果的に進めることができる。ものづくりのモジュールの概念の活用例として、製品設計における設計モジュール、製造工程における製造モジュールなどが存在する。部品単位のマネジメントをモジュール単位に代替させることによって、容易に追加や交換ができ、製品のバリエーションを増やしたり、組立性やメンテナンス性を良くしたりする。

モジュールを実現させるためにはモジュール間のインタフェース（接続部分）が重要とされる。設計モジュールや製造モジュールにおいてもシステム中核部や他の部品への接合部（インターフェース）の仕様が明確に定義されることが重要となる。

（３）プラットフォーム：システムの土台（基盤）

モジュールに類似した概念としてプラットフォームがある。システムのプラットフォームは、システムが機能するための土台（基盤）であり、モジュールと同様に基盤として重要な複数の要素からなり、塊として抽出される汎用性が高いモジュールであるとも理解できる。「ものづくり」において経済価値を実現するためには部品の標準化や共通化が重要とされるが、それらの効用をモジュールに融合させたものがプラットフォームと理解できる。基盤としてのプラットフォームにモジュールや要素が接続されることによってシステムが構築され、プラットフォームを中心としたシステムの構造が形成される意味から、プラットフォームはアーキテクチャと称されることもある。プラットフォームはシステムの目的に応じて存在し、目的の変化に応じてプラットフォームは変化する必要があり、結果的にシステムのアーキテクチャが変化する。

〔プラットフォーム〕 = 〔標準化〕 × 〔共通化〕 × 〔モジュール化〕

〔標準化〕：様々な事柄の出来栄を揃えること。要素、インタフェース

〔共通化〕：複数のシステム間で共有される要素、インタフェース

〔モジュール化〕：システム全体をいくつかの独立したブロック（塊）に分割、要素の結合体

（４）アーキテクチャの特徴的分類：インテグラル型とモジュール型

藤本は、システムが有するアーキテクチャの特徴をモジュールの観点で類別している[11]。インテグラル型（摺り合わせ）アーキテクチャとモジュール型（組み合わせ）アーキテクチャである。モジュール型は、システムの機能と構造（部品／モジュール）の対応関係が簡潔な関係であり、一対一の構造を有するアーキテクチャのタイプである。一方で、機能—構造の対応関係が多対多となる複雑なアーキテクチャとなるタイプをインテグラル型と呼んでいる。藤本によればインテグラル型のアーキテクチャの典型として自動車を挙げており、製品の価値はインテグラル型アーキテクチャにおける摺り合わせ構造が重要であると指摘している。しかしながら、昨今の自動

車は、製品のバリエーションを増やしつつ、経済的価値を高めることを目的にプラットフォームの導入や、モジュラー型の製品構造を積極的に導入している。さらには、電気自動車（EV）の登場に伴い、部品点数の減少をはじめ、PC のマザーボードのようにプラットフォームをベースとしたモジュラー型の組立製品となることが予想される。

（５）アーキテクティング：システム・アーキテクチャのデザイン

このようにプラットフォーム型／モジュール型の製品に変化すると競争の源泉であった「摺り合わせ構造」が減少し、製品がコモディティ化することによる価値の低減が懸念される。しかし、プラットフォームのインタフェース、モジュール間のインタフェースの標準化まで考慮することは価値の源泉を考える上で重要な課題となり、価値を保持する。さらには価値を創成するアーキテクチャのデザインが重要な鍵を握る。アーキテクチャをデザインする行為はアーキテクティングと呼ばれる。アーキテクティングでは、システムを複数の視点（viewpoint）から見て、各視点における要素と要素間の関係をデザインし、デザイン結果として見えるもの（view）を重ねあわせ（Allocation）が行われる。プラットフォームのデザインはアーキテクティングであり、多様な view による検討が要求される。逆に、システムに対する要求が変化することによる view の変更はプラットフォームの変更要求となる。システムの簡略化を維持しつつ、多様な要求に対応できるプラットフォームのデザインは複雑で困難な問題となるが、多様な要求に応じることができるプラットフォームを実現することであれば、変更に対して強いシステムを実現することができる可能性は高くなると考えられる。

【参考文献】

- [10] SEBoK : https://www.sebokwiki.org/wiki/System_Architecture(2022.03.24)
- [11] 藤本隆宏：製品アーキテクチャの概念・測定・戦略に関するノート，RIETI Discussion Paper Series 02-J-008，2002/6，独立行政法人経済産業研究所

4. ダイキン工業の現状と課題

3章で述べたように、ものづくりを取り巻く状況は大きく変化することが予想される。企業は利益を得ながらも社会的な責任を担い、持続的に成長することが求められており、これらの変化に柔軟に、かつ迅速に対応する必要がある。これに対して、空調業界を取り巻く状況を述べたうえで、ダイキン工業のものづくり部門の取り組みの現状と課題を述べる。

4.1. ダイキン工業を取り巻く状況

空調機器は、日本やアメリカなどの先進国においては高い普及率を有している(図 4.1)が、今後の開発途上国の人口増加や経済発展により、空調機器の需要は 2050 年までに 2018 年比で約 3 倍になると予想されている(図 4.2)。既に高い普及率を有している先進国では、消費電力を低減することができるインバータ機が普及してきており、さらに AI を搭載した空調制御システムなど、空気、空間の質を高める新たな商品提供やサービス化が始まっている。一方、普及率の低い新興国では、健康な生活を維持するためのインフラとしての空調機器が求められており、普及の拡大が最優先となっている。また、地域毎の気候等によっては暖房が不要であったり、高負荷環境での運転が必要であったりと、各国の特徴も考慮した商品づくりが必要である。

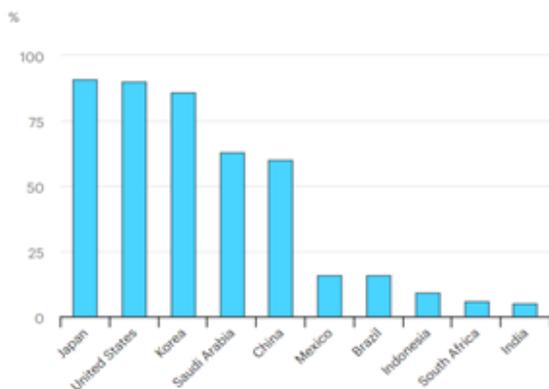


図 4.1 空調普及率(2018年)[12]

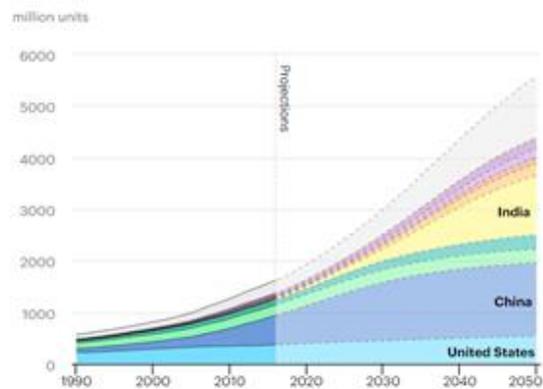


図 4.2 世界の空調需要予測[12]

また 3.1.1 節に記載のように、近年はカーボンニュートラルをはじめとした環境課題が社会課題として注目されているが、特に空調機器は使用時の消費電力量が多いことから、消費電力を低減する取組としてインバータ技術などの機器の効率化や ZEB（Zero Energy Building）を始めとした空調システム全体の省エネの取組が進められている。空調機器は省エネなどの観点から地球温暖化係数(GWP：Global Warming Potential)が高い冷媒を使用しているのが現状であり、今後は大気に放出されてしまった場合でも環境負荷が小さく、機器の運転効率が高い低 GWP 冷媒の検討が進められている。

以上のことから、ダイキン工業は、急激に増大する需要への対応と、環境に代表される社会ニーズと多様な顧客のニーズに対して、商品、サービスを主軸とした適切な価値を創り、提供していく必要がある。

4.2. ダイキン工業のものづくり部門の現状と課題

ダイキン工業は開発・生産拠点を市場近くに作る「市場最寄化」を基本的な事業戦略として、地域ごとの拠点をベースに現地密着型製品の創出と独自の販売店開拓を行っている。現在では世界に 100 か所以上の生産拠点や開発拠点を持ち(図 4.3)、地域に合った空調機器を提供するとともに、空調機器の開発・生産を通じて、それぞれの地域の雇用拡大や現地企業との協調といった社会的責任を果たすことを前提に、各国・地域の文化や歴史を尊重しながら、事業を営む地域社会の一員としても活動を続けてきた。ダイキン工業は 3 章に記載の日本のものづくり産業の衰退傾向とは異なり成長を続けてきた企業であり(図 4.4)、2021 年 3 月末時点では、海外売上比率は 77%、海外を含めた従業員数は約 85,000 人、海外従業員比率は 84%を占める。これまで世界各国にもものづくりを展開し、それぞれの地域に貢献してきたことを強みとするダイキン工業は、今後もものづくりを持続させていくことで社会に貢献していく。



図 4.3 グローバル展開の概要[13]

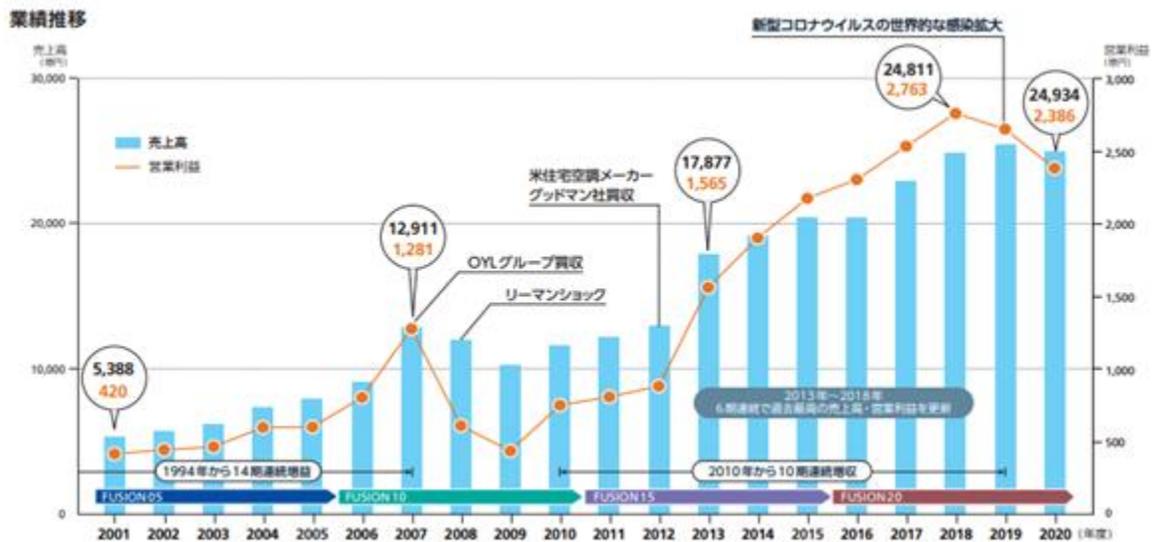


図 4.4 ダイキン工業の業績推移[13]

以下本節では、3章や前節で述べているような顧客や社会のニーズに対して的確に、かつ迅速に価値を創り、提供し続けるためのダイキン工業のものづくり部門の現状の取り組みと課題を記載する。

4.2.1. これまでの取り組みと課題意識

図 4.5 は現状の新商品開発時の空調事業のプロセスの概略を記載している。これまでの事業プロセスにおいては、企画、設計、・・・というように、上流から下流へとプロセスが流れていく構造となっている。現在のプロセスは、上流からの要求に対して各プロセスを実行するため、進捗の管理の容易さや業務の設計の容易さなどにメリットがあったものの、顧客や社会のニーズが激しく変化することを想定すると、現在のような縦割りでのプロセスではニーズに対応できず、成り立たない、という危機感がある。

激しい社会変化に適応できる持続可能なものづくりを実現するための空調事業プロセスを考えるうえでの課題整理のため、将来的な役割を含め下記 3 つの層に分割することとし、以降はこれらの用語を使用する。

企画層：市場動向・国際情勢等の外部環境の状況と展開層・実行層のキャパシティを考慮しながら顧客ニーズや社会ニーズを実現する商品の企画や、スループット、在庫量、リードタイムなどの従来的なサプライチェーン性能指標に加え、レジリエンス、CO₂ 排出量等を考慮し、強靱なサプライチェーンを俯瞰的な視点で企画・設計する役割を担う。

展開層：企画層の構想を、実行層で実現する方法を決定する業務と、実行層の効率化の手段を検討する業務を持ち、企画層と実行層を繋ぐ役割を担っている。ものづくり部門においては、製品設計から生産設計（工法開発、工程設計）までを担い、生産に関する商品情報・価値を与える業務と、実行層が管理している既存の生産ラインに対して、より商品価値を向上させる手段を技術の面から検討する業務を持つ。

実行層：企画層と展開層が決定した内容、情報を、決められた価値そのままに物理世界に対して実行する。実行するためのスケジューリングや管理を含み、実行後の実績データを収集するとともに、価値を企画通りに提供できない場合の改善提案を実施する役割を担う。

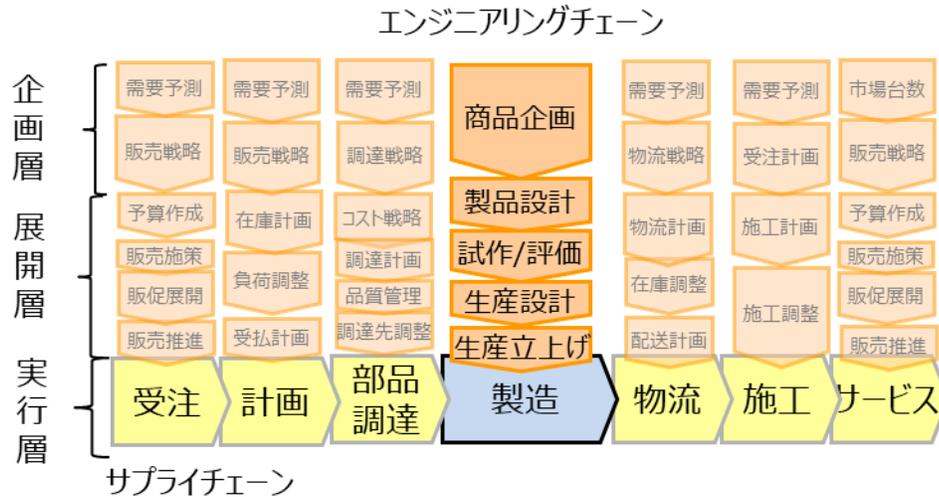


図 4.5 新商品開発時の空調事業プロセスの概略

4.2.2. ものづくり部門の企画層、展開層、実行層の課題

(1) 企画層

今後新たに発生してくる社会ニーズや顧客ニーズに柔軟に対応していくためには、エンジニアリングチェーン、サプライチェーンの各プロセスを部門ごとに改革していくのではなく、全体を統合して構造を迅速に変更していく必要がある。そのためには、エンジニアリングチェーン、サプライチェーンの情報を集約し、全体視点での意思決定ができるよう支援することが必要になる。現在は、設計開発プロセスにおいては要所で下流工程の部門が広く参画してデザインレビューを行うことで各プロセスを担当する部門間の情報共有をしながら設計開発を進めている。一方で、部門間連携の手段が依然として旧来的な会議体が中心となっており、情報の共有や意見交換が不足している。そのため、情報集約の仕組みや、集約された情報を理解しやすい形で整理する方法が必要である。

また、エンジニアリングチェーンとサプライチェーンは複数の要因が関係し、その全体像を把握することは困難であるため、設計開発においてはサプライチェーンまで考慮した設計開発は担当者の経験と勘に依存した限定的

な取り組みとなっており、サプライチェーン側でも部門ごとでの効率化に留まっている。しかし、特定のプロセスやライフサイクルステージのみを対象とした局所的な視点で価値提供を考えると、ニーズに対して優れた価値提供ができず、例えば環境負荷低減のニーズを実現するために、設計変更により製品使用時の消費エネルギーを抑制すると、製造時や廃却過程などの別のプロセスで環境負荷が増加したり、製品使用時の快適性が下がったりする。したがって、優れた価値提供のためには、部門間の壁を超えて情報を集約し、ライフサイクル全体視点で顧客ニーズや社会ニーズへの影響要因の相互関係を把握した上で製品やサプライチェーンの企画・設計を行えるようにする必要がある。

さらに価値提供の維持の観点では、サプライチェーンの企画段階から自然災害／資源不足／市況高騰などの突発的な外部環境の変化の発生時にも柔軟に対応・回復できるようリスク要因を予め考慮することや、過去にないリスクが発生したときにも、そのリスクに対応したサプライチェーンの変更を行えるようにする必要がある。

（２）展開層

製品及び生産設計を通して、構想を実現化する手段を検討する展開層においては、個々の要素部品の機能検討から、部品間の機能の擦り合わせ、生産ラインにおける工程設計まで、CAD/CAE 等のデジタル技術を設計支援ツールとして活用しているが、解析精度の課題により、試作、実試験が評価の主体となり、過去の実績を元に決定される傾向にあった。その為、過去の実績を元に決定された製品、生産仕様は、最適な手法の選定が十分出来ていない為、構想との「ギャップ」を保持した製品仕様、生産方法が実行層に展開される。また、解析を含む設計の多くは、要素毎の個別評価であるがゆえに、部品間の擦り合わせの際の最適化が困難であり、実試験の評価は多くの時間、工数を要する為、迅速性に欠けている。今後はデジタル技術を高度化していく事で解析の信頼性を高め、実評価の最小化による開発期間の短縮と、設計、生産手法の最適化により「ギャップ」を最小化する事が必要である。

また、個々のデジタル技術の相互連携を進め、複数のプロセスを同時並行的に検討できるコンカレントエンジニアリング体制を実現する事で設計要求の全体最適化へと繋げる。

一方、生産設備については既存製品の量産を想定した構成になっており、同じ商品を提供し続ける場合には経済性が高いが、大きな製品仕様の変更を伴う場合は設備仕様・レイアウトの大きな変更が必要となり迅速さに欠けるため、ニーズの多様化に対応できる変種変量の生産ライン構築が必要である。

(3) 実行層

ものづくり部門の実行層である製造においては、生産を止めないことが重要である。ダイキン工業のものづくりの思想である「PDS (Production of DAIKIN System) 生産」の一つの柱であるジャストインタイムの生産方式は環境的サステナビリティに対しても有用であると考えており、今後もその思想に基づき実行し続けるが、それを維持するためのリスク、変化への対応は、従来では熟練者の知識やノウハウに依存してきた。

止まらない工場を目指すために、従来の PDS を進化させ、柔軟に変化する要求に対して、属人化した知識やノウハウに依存せず即時に対応できる高度な生産の実現、労働人口が減少する中でもものづくりを支える人材の確保と、D&I を考慮した労働の質の向上が必要である。

【参考文献】

- [12] International Energy Agency, The Future of Cooling, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- [13] ダイキン工業株式会社, 統合報告書 2021, https://www.daikin.co.jp/-/media/Project/Daikin/daikin_co_jp/investor/data/report/daikin2021_printing-pdf.pdf?rev=a3d73b7baada48229a30dcb360490352

5. 次世代ものづくりアーキテクチャ

「ものづくり」システムが基盤とする社会システムは絶えず変化する。国際的な紛争や感染症、さらには地震、台風などの自然災害の発生は社会システムの機能をストップさせてしまう。これは、「ものづくり」システムに対する外部システムからの影響となり甚大な影響を及ぼす。また、新興国の経済的発展は新たなマーケットを創出するとともに、持続可能な世界の実現に向けた様々な活動によってグローバルな価値構造は変化する。このような基盤となる社会システムの劇的な変化は避けられず、「ものづくり」の持続可能性を高めるための努力は必須である。

古くから、外部システムの変化に対して柔軟に対応できるリコンフィギュラブル（Re-Configurable：再構成可能）なシステムの必要性が議論され、多くの研究、事例などが報告されてきた。「ものづくり」に近いところでは、Reconfigurable Manufacturing System（RMS）が1990年代から議論されており、多品種少量生産型の製品への適応が期待され、その取組は継続されている。最近では、突発的な変化に対するレジリエント性も考慮した Resilient Manufacturing System の必要性も提唱され、社会システムの不確実な変化への対応が望まれており、システムの変化性を意味する Transformable Systems / Systems Transformation などの概念が登場している。この Transformation も含め、Reconfigurable や Resilient な Manufacturing System が備えるべき特性は、変化に対するロバスト性、フレキシブル性とレジリエント性である。本章では、Reconfigurable/Resilient Manufacturing System の上位概念と認識できる Supply Chain Transformation / Transformable Supply Chain を参照しながら、外部システムの変化に対して強く、靱やかに対応できる「次世代のものづくり」に必須となるアーキテクチャについて考えることとする。5.1 節では「次世代ものづくりアーキテクチャ」について考え、それを踏まえて 5.2 節では、ダイキン工業のものづくり部門の目指す姿を述べる。

5.1. 次世代ものづくりアーキテクチャとは

(1) 変化するアーキテクチャ : Transformable Architecture

前述のように、持続可能な「ものづくり」は外部システムである社会システムの変化に強く、靱やかに対応する必要がある。社会の不確実度が増加し、変化の頻度も増し、国際競争力が激化する中では、その対応には迅速性が強く求められる。複雑なシステムの迅速な変化対応については、中央集権的よりも自律分散的なマネジメントが望ましいと言われる。事実、現在の「ものづくり」のシステムは自律分散的なマネジメントによって変化対応している部分が多く、社会システムの劇的な変化に対応してきたと言っても過言ではない。しかしながら、そのマネジメントは経験と知識を蓄積してきた優秀な管理者、技術者、技能者らの属人的な能力に強く依存しており、彼／彼女らが高齢化を迎えて退職する内部システムの急激な変化も無視できない。

このように現代社会の外部システムの変化によって複雑化、大規模化する「ものづくり」のシステムは、その内部システムの変化を考慮した適切な対応が求められるといった、極めて深刻な問題を抱える。昨今、ICT や AI を駆使する DX (Digital Transformation) が注目を集めるが、その DX の潜在的な能力を最大に活用するためには「次世代ものづくり」の見取り図であるアーキテクチャをデザインする必要がある。

「次世代ものづくり」が備えるべき要件は、その内部システムの変化を前提に外部システムである社会システムの変化に対する対応力である。その対応力には、頑健性、柔軟性、迅速性などが求められる。つまり、頑健性、柔軟性、迅速性などを有した「次世代ものづくり」のシステムをデザインすることが重要であり、そのシステムのアーキテクチャについて考えることは重要課題である。特に柔軟性、迅速性を実現するシステムのアーキテクチャはどのような機能を実装すべきかを検討することは重要であると考えている。

システム・アーキテクチャはシステムの「見取り図」である。外部システムと内部システムとの関係定義からはじまり、システムを構成する要素、構成要素間の関係などを構造として見做す意味から「アーキテクチャ」と呼ばれる。柔軟性、迅速性を考えるに、アーキテクチャ自体の変化も視野に入れる必要がある。言い換えれば、柔軟に迅速に変化することができるアーキテクチャ (Transformable Architecture) の実現が必要である。外部システムの変化に適用するために内部システムの「見取り図」であるアーキテクチャを柔軟に迅速に変化させ

る。「見取り図」を書き換えるのである。アーキテクチャが変化するためには、アーキテクチャを構成する要素と要素間の関係が変化する必要がある。それらが自由に変化するのが望ましいが、要素間の関係の整合性を確保したうえで、システム全体が最適になるようにアーキテクチャが変化する必要がある。

（２）次世代ものづくりアーキテクチャの要件

以上に述べた「アーキテクチャの変化」に基づいて「次世代ものづくりアーキテクチャ」に対する要件を考える。「ものづくり」には様々な活動が存在し、それらを大局的に捉えると二つの活動のチェーンが認識される。エンジニアリングチェーンとサプライチェーンである。さらには次世代を考える時、これらはライフサイクル方向に展開されることが必須であり、エンジニアリングチェーンはメンテナンス、リユースなどの循環までを対象とするものとなる。同様にサプライチェーンはライフサイクル全体を対象とするライフサイクルバリューネットワークとなる。本章では、このように広義の意味でエンジニアリングチェーン、サプライチェーンと呼ぶことにする。

製品は様々なコンポーネントや部品が構造を形成しており、複雑なインタラクションで製品の機能が実現されるシステムである。このシステムとしての製品が二つのチェーンを流れる。エンジニアリングチェーンにおいては製品を実現化するために必要な情報を生成し、サプライチェーンでは、工場の人と機械、製品の複雑なインタラクションによって、製品を物理的に実現化する流れが形成される。これに限らず、これらのチェーンでは自社だけでなく社外の関連企業も関連し、製品を使用するユーザー（顧客）も重要な要素として関連する。このように、「ものづくり」の実施には、例えば、顧客（エンドユーザー）、エンジニア、労働者、機械、施工業者などの様々な種類の要素／システムが関与しており、それらの要素／システムの複雑なインタラクションによって多様な価値が創出される。

3.1.2 節「価値提供」では、「ものづくり」における価値は多種多様な要素／システムの接点において創成されことを述べた。一方で、3.2.4 節「アーキテクチャとモジュール化」では、システムの構成要素と構成要素間の相互関係、さらにはシステムとシステム間の相互作用からなるネットワークの構造をアーキテクチャとして捉えることを述べた。これらの基本的な考え方を統合すると、「ものづくり」のアーキテクチャは「ものづくり」に関係する多種多様な要素／システムの関係によって定義され、その関係の所存により生起されるインタラクションによって価値

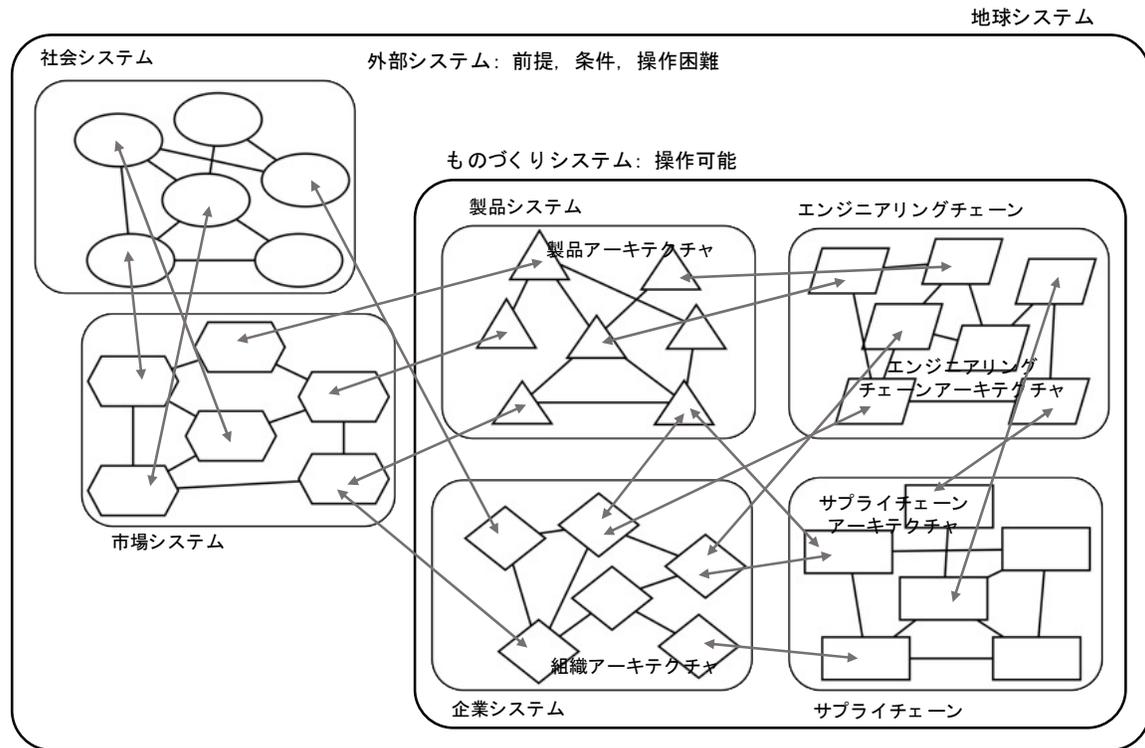
が創成されると理解できる。したがって、激しく変化する社会が要求する多様な価値を創成できる「次世代ものづくりアーキテクチャ」は、「ものづくり」のシステムとして、その構成要素と構成要素間の相互関係、さらにはシステムとシステム間の相互作用からなるネットワークの構造であり、その構造によって創成される価値を明確にする必要がある。その上で、システム間の関係やシステムの構成要素間の関係を考慮した変更に対応する必要がある。要素／システムを変更する際の影響範囲の特定、変更によって生じるトレードオフ問題／背反問題の顕在化、およびそれらを解消するための方策の検討などを適切に迅速に対応できることが肝要である。そのためには、サプライチェーン、エンジニアリングチェーンを構成する要素に関連する情報が集約され、情報に基づいた意思決定ができる仕組みが重要となる。

以上を総括すると、「ものづくりアーキテクチャ」は、もの自体のアーキテクチャは勿論のこと、ものを開発し、設計し製造するエンジニアリングチェーンのアーキテクチャ、ものを製造し顧客に提供し、社会に価値を提供するサプライチェーンのアーキテクチャを対象とする総体である。したがって、「ものづくりアーキテクチャ」を考えるためには、ものづくりを実現する様々なシステムの相互関係、相互作用を考慮する必要があり、意思決定に必要な情報が瞬時に集約できることが求められる。まさに複合システムと呼ばれる System of Systems におけるシステム間のインタラクションを考慮し、その中での価値の創成のメカニズムを検討する必要がある。

製品システムのライフサイクルにおいて関係するアーキテクチャを列挙すると、製品アーキテクチャ、工程アーキテクチャ、組織アーキテクチャ、市場システムなどが一例として挙げられる。これらのアーキテクチャのインタラクションが「ものづくり」の価値を創成するのである。この中で、全体システム（System of Systems）の最適化（変化への対応性）の必要性を理解し、対応力が高いアーキテクチャであるシステムの構造を議論し、創成することが肝要である。

図 5.1. が示すように、多様なこれらのアーキテクチャは独立ではなく、相互に依存し関連する。したがって製品システムのプラットフォームを検討する際には、エンジニアリングチェーンアーキテクチャは勿論のこと、サプライチェーンに關係する組織アーキテクチャや市場システムなどを考慮する必要があり、ライフサイクル全体の目的を明確にした上で、構成、関与するシステムのプラットフォームをデザインし、そのプラットフォームに対してモジュール、

要素を適切に関連させる必要がある。つまり、アーキテクチャ間の相互依存性を考慮したプラットフォームをデザインすることが要求される。



- ・ 市場（顧客）システム：要求価値×サービス×製品
- ・ 製品アーキテクチャ：製品機能×製品構造
- ・ エンジニアリングチェーンアーキテクチャ（開発／設計／製造）：製品×エンジニアリングチェーン機能
- ・ サプライチェーンアーキテクチャ（調達／製造／物流／サービス）：製品×サプライチェーン機能
- ・ 組織アーキテクチャ：エンジニアリングチェーン機能×エンジニア、サプライチェーン機能×リソース（技能者／設備／サプライヤー）

図 5.1 「ものづくりアーキテクチャ」と外部システムの関係構造

以上のように多種多様なシステムが多様に相互依存する問題では、アーキテクチャ自体を理解する必要がある。その理解のためには、

- ・ アーキテクチャの記述方法、生成方法
- ・ アーキテクチャの分析方法：構造分析、ネットワーク分析、シミュレーション

- ・ アーキテクチャの俯瞰方法

などの手法を確立する必要性は高く、それを支援するシステムが待望される。

5.2. ダイキン工業のものづくり部門の目指す姿

前節に記載のように、激しく変化する社会の要求に応じた価値を創出し、提供し続けるためには、社会の変化に応じて企業全体のシステムの構造を変えていく必要がある。

ダイキン工業のものづくり部門は、顧客や社会のニーズの変化に対応するための企業構造の変化をデジタル上でシミュレーションし、得られた最適解を現実世界で精度よく実行し、その結果をフィードバックするという一連のサイクルの実現を目指して、各層における目指す姿を以下のように示す。

(1) 企画層

社会の変化に応じて企業全体のシステムの構造（アーキテクチャ）を変えていくためには、ものづくり部門の戦略策定支援と、策定された戦略に基づきアーキテクチャを正確かつ迅速に構築、変化させる必要がある。このためには、全体アーキテクチャの構造やシステムとしてのふるまいの把握のための可視化やシミュレーションが有効であると考えられる。

具体的には、エンジニアリングチェーン・サプライチェーンの各プロセスの流れや、それぞれのプロセスにおける活動、意思決定の因果関係を構造化し、キーパラメーターを包含した、全体アーキテクチャ設計のためのシステムモデルと計算技術を構築することを目指す。その際、システムモデルには製品や工場等の自社内のシステムだけでなく、自社システムに影響を与える市場や供給網などの社外システムのモデルを含めることで、外的影響を考慮しながら市場要求から製品設計、生産計画、供給計画等へと素早く的確に展開可能にすることを目指す（図 5.2）。また、数理計算で確度の高い結果を迅速に得るために、デジタル技術の活用により全体アーキテクチャと展開層・実行層が担う個々のアーキテクチャのシミュレーション・最適化を相互に連動させ、結果のやり取りやモデルの更新を可能にすることを目指す。

近年は、商品の機能や品質はもちろんのこと、環境課題、社会課題に対応できているかも、商品を選択する際の価値基準として重要視するようになってきている。そのため、戦略の検討においては、マス・カスタマイゼーションの実現や、所有によらない価値提供、持続可能なものづくりのための製品のメンテナンス性やリサイクル性の向上および使用済み製品・部品の再生・回収のためのサプライチェーンの構築など、新たな顧客ニーズ・社会ニーズに対して製品構造やサプライチェーンの構造の見直しの検討をできるようにすることを目指す。さらに、エンドユーザーに商品・サービスを提供し続けられる強靱なサプライチェーンを構築するために、自然災害／資源枯渇／市況高騰などのリスクがサプライチェーンに与える影響を可視化し、リスクへの対策を検討する際にはその有効性を定量的に評価できるようにすることを目指す。

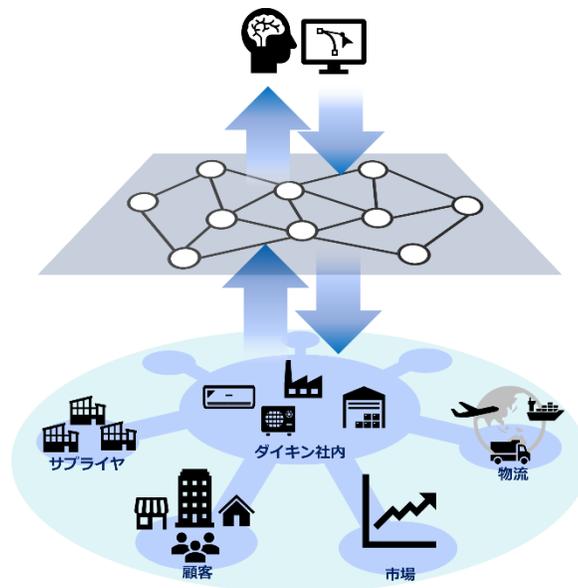


図 5.2 社内外システムのモデル化イメージ

(2) 展開層

全体アーキテクチャ設計のシミュレーションの信頼性を高めるため、個々の要素技術のデジタルツインの高精度化と、解析対象ごとに異なる解析結果を一つの指標で評価できるように結合する仕組みの構築を目指す。これにより、例えば加工であれば、正しく加工現象を解析、評価することが可能となり、その結果を企画層へフ

ィードバックすることで評価システムの信頼性が向上する。また、実評価を最小限に抑えたスピーディーな生産準備を可能にし、構想時に提案された商品の要求に対して全体最適な生産方法を選択する事が可能になる。

生産現場においても、変動するニーズに対して迅速な対応が可能となる変種変量ラインの構築を目指す。具体的には、設備や治具の共通化によって、ラインのレイアウト変更や段替え時間を極小化する取組や、設備稼働の状態監視によるライン効率化を検討する。

(3) 実行層

実行層においては、激しく変化する顧客ニーズや社会ニーズに応じた創出価値を着実に提供し続けるため、高い生産性を維持できる「止まらない工場」の構築を目的とする。また実現に向けての課題としては、労働人口が減少する中でもものづくりを持続させるため、デジタルトリプレットの考え方に基づいた作業者が持つ知識・ノウハウのデジタル化と、作業現場の働きの質の向上に取り組む。

6. 共同研究課題

本社会連携講座では、5章に記載の姿の達成に向け、2022年時点では下記4テーマについて取組を進める。社会連携講座を実行する中で、必要に応じて共同研究テーマを追加、変更していく。

（1）しなやかなサプライチェーンを実現する Transformable Architecture のモデリング

ものづくりはエンジニアリングチェーン（EC）、サプライチェーン（SC）の各フェーズの活動により達成され、SCやECにおける1つの決定事項が様々な局面に波及的に影響を及ぼしているため、優れた解を得るにはEC・SCを包括的にとらえて考える必要がある。本テーマはこれらのチェーンを取り巻くダイナミクスの包括的なモデリングに取り組み、課題の特定や戦略の評価を可能とすることを目的とする。

（2）機械加工のデジタル化技術開発

全体アーキテクチャ設計を実現する為に、ものづくり領域においては製造プロセスの個々の要素技術においてデジタル上で加工精度を予測する解析環境を構築しながら、要素技術ごとの解析結果を結合してシステム全体を評価する仕組みが必要である。本テーマは要素技術の中から、機械加工を対象として解析に関する基盤技術構築を目的とする。

（3）強い現場力を進化させ続けるデジタルトリプレット型 CPPS の実現

従来以上に変化・変動に強いものづくりを実現するため、日本の強い現場力をデジタルツインに融合させ、さらに進化させ続けられるデジタルトリプレット型 CPPS を構築する。

（4）ワークエンゲージメント向上に向けた作業員デジタルツインの実現

持続可能なものづくりの実現には、人が重要な役割を担っている。労働力不足が進む中でも人に働き続けてもらうため、高い生産性を維持しつつ、作業員のワークエンゲージメントを向上させる仕組みの構築を目指す。

執筆者一覧

氏名	所属	役職	執筆分担
梅田 靖	東京大学大学院工学系研究科 人工物工学研究センター	教授、PI ^{※1}	1章、3.1.1節、3.2.3節
青山 和浩	東京大学大学院工学系研究科 人工物工学研究センター	教授	3.1.2節、3.2.4節、5章 5.1節
杉田 直彦	東京大学大学院工学系研究科 人工物工学研究センター	教授	3.2.2節
大竹 豊	東京大学大学院工学系研究科 人工物工学研究センター	准教授	3.1.4節、3.2.1節
長藤 圭介	東京大学大学院工学系研究科 人工物工学研究センター	准教授	3.1.3節
舒 利明	東京大学大学院工学系研究科 人工物工学研究センター	特任講師	2章、3章、3.1.5節
高山 正範	ダイキン工業 TIC ^{※2}	GL ^{※3} 、主席技師	4章、5.2節、6章
高根沢 悟	ダイキン工業 TIC ^{※2}	GL ^{※3} 、主任技師	4章、5.2節、6章
原田 真征	ダイキン工業 TIC ^{※2}	GL ^{※3} 、主任技師	4章、5.2節、6章
浜 靖典	ダイキン工業 TIC ^{※2}	主任技師	4章、5.2節、6章
横瀬 清識	ダイキン工業 TIC ^{※2}	—	4章、5.2節、6章
半田 陽一	ダイキン工業 TIC ^{※2}	—	4章、5.2節、6章
西澤 孝行	ダイキン工業 TIC ^{※2}	—	4章、5.2節、6章
高須賀裕介	ダイキン工業 TIC ^{※2}	—	4章、5.2節、6章
伊藤 愛	ダイキン工業 TIC ^{※2}	—	4章、5.2節、6章
澤井 伽奈	ダイキン工業 TIC ^{※2}	—	4章、5.2節、6章

※1 PI：代表研究者

※2 TIC：テクノロジー・イノベーションセンター

※3 GL：グループリーダー

東京大学 大学院工学系研究科 人工物工学研究センター
社会連携講座「次世代ものづくりアーキテクチャ」

<http://nextarch.race.t.u-tokyo.ac.jp>

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

Tel：03-5841-6990

e-mail：info-nextarch@race.t.u-tokyo.ac.jp