

〈論文〉

新たな品質管理研究のトレンド「品質 4.0」の 理論展開と今後の展望

潘 宝 燕

キーワード

品質 4.0
品質管理
第 4 次産業革命
サイバー・フィジカル・システム
IoT
AI
理論研究
日本企業

目 次

1. はじめに
2. 文献検索の手続きと国内外の品質管理研究の動向
3. 品質 4.0 についての先行研究
 - 3.1 品質 4.0 の定義
 - 3.2 品質 4.0 の技術とそれが企業の品質管理に与える影響
 - 3.3 品質 4.0 を導入する動機・利点
 - 3.4 品質 4.0 の導入・実現の先行要因
 - 3.5 小括
4. 結論

1. はじめに

2011 年にドイツ政府がインダストリー 4.0 という用語を提唱して以来、第 4 次産業革命とも呼ぶべき IoT (Internet of Things: モノのインターネット), AI (Artificial Intelligence: 人工知能), ビッグデータなどによる技術革新は、従来にないスピードで進行しつつ、巨大なインパクトを与えている (経済産業省, 2016)。近年、海外では、第 4 次産業革命における品質管

理のあり方に関する研究が盛んになっている中で、品質 4.0 が新しい研究トレンドとなっている。品質 4.0 という用語は、Jacob (2017) によって最初に提唱された。品質 4.0 は、新たなトピックであるため、その定義や技術、利点、動機、先行要因については必ずしも十分に議論されていない (e.g. Sader et al., 2021; Antony et al., 2022a) と指摘される。

日本の製造業における 2010 年以降の IT 投資額は、有形 (情報通信機器) 資産と無形 (ソフトウェア) 資産のいずれも横ばいとなっており、DX (Digital Transformation: デジタルトランスフォーメーション) の重要性が広く認識されるようになる中でも投資額は増加していない (経済産業省他, 2022) と指摘されている。品質管理の観点から第 4 次産業革命の技術の導入はなぜ企業にとって重要なのか、つまり「第 4 次産業革命の技術は、企業の品質管理にどのように影響を及ぼすのか、企業がそれらを導入する動機・利点・先行要因は何かを明確にすること」は現実からの要請に応えるものとなりうる。

そこで、本稿では、近年の海外の品質管理研究のトレンド「品質 4.0」についての理論研究を通して、品質 4.0 の定義、技術は何か、品質 4.0 を構成する技術変化は何か、品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理にどのように影響を与えるのか、企業が品質 4.0 を導入する動機・利点、導入・実現の先行要因は何かを理論的に検討する。そのうえで、今後の品質管理研究の展望を示したい。

2. 文献検索の手続きと 国内外の品質管理研究の動向

本稿の文献レビュー方法は次の通りである。まず、学術論文書誌データベースである Web of Science の Business および Management 分野において、“quality 4.0”の英単語をタイトル、概要、キーワードに含む論文を検索した。検索にヒットした論文は、443 件である（2023 年 6 月 1 日時点）。なお、ここでは、タイトル、概要、キーワードに quality 4.0 という用語が入っている論文のみをカウントしており、検索方法によってはこれよりも多くの論文が捕捉される。図 1 は、品質 4.0 について、Web of Science に採録されている論文の出版数と引用数の推移を記録したものである（2023 年 6 月 1 日時点）。図 1 が示しているように、品質 4.0 の概念が初めて提唱された 2017 年以降、品質 4.0 についての研究は急激に増加し、新たな品質管理研究のトレンドになっている。検索にヒットした文献の全てに触れることは物理的に困難であるため、本稿では、引用数の多いものから順に論文検索を行い、引用数の多いものから順にレビューを行った。その中から、筆者が必要と考えるものを取り上げている。また、レビ

ュー作業においては、引用関係から必要な書籍・論文などを適宜レビューに加わった。

日本語文献については、国立情報学研究所が運営するデータベース CiNii において“品質 4.0”，“第 4 次産業革命 品質”，“インダストリー 4.0 品質”といった単語を用いて論文検索を行った。その後、学術雑誌名や論文のタイトル、アブストラクトから経営学分野の論文を特定する作業を行ったが、ヒットした経営学分野の論文はなかった。さらに、国立研究開発法人科学技術振興機構が運営する電子ジャーナルの無料公開システム Jstage において、『組織科学』、『日本経営学会誌』、『国際ビジネス研究』といった学術誌に限定して、“品質管理”という単語を用いて論文検索も行った。『組織科学』でヒットした論文数は、80 本、『日本経営学会誌』でヒットした論文数は、9 本、国際ビジネス研究でヒットした論文は、28 本であった（2023 年 5 月 6 日時点）。ヒットした論文をレビューした結果、品質管理に焦点を絞った研究は、潘（2021a）、潘（2021b）のみであった。

このように、近年、特に 2017 年以降、海外では、第 4 次産業革命における品質管理のあり方に関する研究が盛んになっている。その中で、品質 4.0 が品質管理研究の新しいトレンド

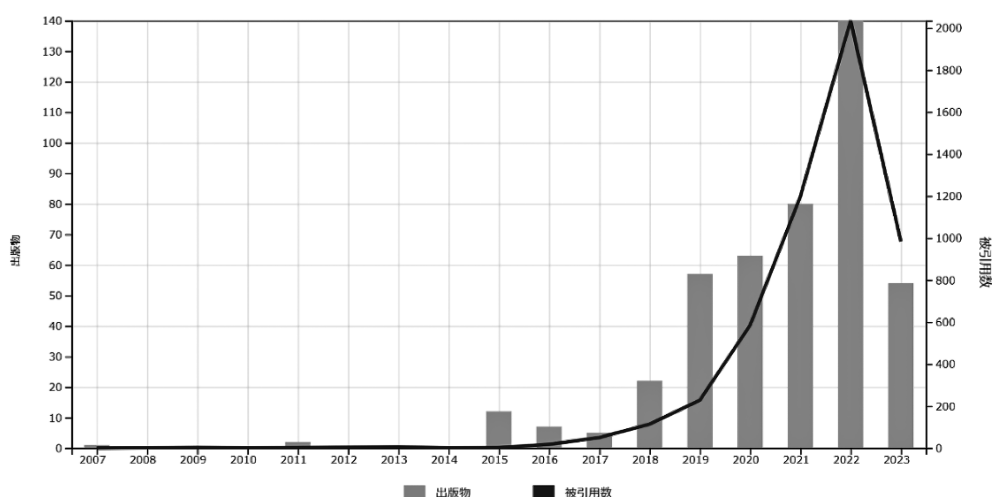


図1 quality 4.0 をタイトル、概要、キーワードに含む論文の出版および引用状況
注：2023 年は 2023 年 6 月 1 日時点のデータである。

(e.g. Jscob, 2017; Sader et al., 2021) として注目されている。他方、日本では、経営学分野の主要学術誌における品質管理に関する論文の減少が目立ち、品質管理についての研究関心は低下している。

3. 品質 4.0 についての先行研究

3.1 品質 4.0 の定義

Sader et al. (2021) は、品質 4.0 を定義するには、2つのアプローチがあると指摘した。一つ目は、第4次産業革命の技術を従来の品質管理実践と統合した結果 (e.g. Enke et al., 2017; Jacob, 2017; Radziwill, 2018) として捉えるアプローチである。例えば、Aldag & Eker (2018) は、品質 4.0 を「機械学習、クラウド・テクノロジー、ビッグデータ、コネクティビティ・デバイス、IoT、AI などの第4次産業革命の新しい技術と、従来の品質管理の実践と手法との融合」と定義した。このアプローチによると、品質 4.0 は、従来の品質管理慣行を置き換えるのではなく、第4次産業革命の技術を活用することで従来の品質管理慣行の改善につながる。

二つ目は、従来の品質管理の3つの進化段階を想定して、品質 4.0 を品質管理の新しい第4の進化段階として捉える (ASQ, 2018) アプローチである。ASQ (2018) は、品質 3.0 から品質 4.0 への進化は、インダストリー 3.0 からインダストリー 4.0 への進化と同時に発生したと結論づけており、製造における高度な技術の活用により、品質 4.0 とインダストリー 4.0 が進化していると指摘した。ただ、このアプローチでは、品質 4.0 と従来の品質管理の違いは何か、つまり何をもって品質 4.0 は新たな品質管理の段階と言えるのかについては必ずしも明確にされていない。

以上のように、品質 4.0 の定義について2つのアプローチがあるが、その共通点は、「第4次産業革命の技術は、企業の品質管理に影響を与える」という点である。品質 4.0 を「第4次産業革命の技術を従来の品質管理慣行と統合した結果」として捉えるアプローチは、品質 4.0

は、従来の品質管理慣行を置き換えるのではなく、第4次産業革命の技術を活用することで従来の品質管理慣行の改善につながると捉える。一方、品質 4.0 を「品質管理の新しい第4の進化段階」として捉えるアプローチは、新たな品質管理の段階を主張する。

では、品質 4.0 は、従来の品質管理を改善しているだけだろうか、それとも新たな品質管理の段階として捉えるべきだろうか。この問題を検討するために、品質 4.0 の技術は何か、それらは企業の品質管理にどのように影響を与えるのかを明確にする必要がある。

3.2 品質 4.0 の技術とそれが企業の品質管理に与える影響

これまで品質 4.0 の技術が企業の品質管理に与える影響について断片的に言及している研究は数多く蓄積されてきたが、品質 4.0 の技術が企業の品質管理に与える影響を網羅的もしくは体系的に整理している研究 (e.g. Küpper et al., 2019; Saihi et al., 2023; Markatos & Mousavi, 2023; Sader et al., 2021) は多くない。筆者の知り得る限り、これまでの研究では、品質 4.0 の技術は何か、品質 4.0 を構成する技術変化は何か、それが企業の品質管理にどのように影響を与えるのかについては必ずしも十分に検討されてこなかった。

そこで、本節では、品質 4.0 の技術が企業の品質管理に与える影響についての先行研究で明らかになったことと残された課題を整理したうえで、品質 4.0 の技術は何か、品質 4.0 を構成する技術変化は何か、品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理にどのように影響を与えるのかという視点で品質 4.0 の技術が企業の品質管理に与える影響を理論的に検討する。

3.2.1 品質 4.0 が企業の品質管理に与える影響についての先行研究

(1) Küpper et al. (2019)

Küpper et al. (2019) は、BCG (ボストン・コンサルティング・グループ) が ASQ (米国品質管理学会) および DGQ (ドイツ品質基準)

と連携して行ったオンライン調査の結果に基づいて、バリューチェーンの全ての段階においての品質 4.0 の重要性を見出した。具体的に、品質 4.0 は、①製造、②研究開発、③サービスとアフターセールス、④調達、⑤物流、⑥クロスファンクショナルという 6 つの段階において重要である。

本稿では、表 1 のように、Küpper et al. (2019) の内容を、利用可能な技術とそのバリューチェーンの各段階への影響に分けて整理している。品質 4.0 の技術のバリューチェーンの全ての段階への影響という視点は、品質 4.0 の技術が企業の品質管理に与える影響を捉える上で、重要な視点である。

しかし、表 1 のように、Küpper et al. (2019) は、品質 4.0 で利用可能な技術およびそれらのバリューチェーンの各段階への影響について、必ずしも網羅的かつ体系的にレビューできていない。どの品質 4.0 の技術がどのようなメカニズムで品質管理にどのように影響をしているのかに関しての対応関係も必ずしも明確にされて

いない。

(2) Saihi et al. (2023)

Saihi et al. (2023) は品質制御 (QC)、品質保証 (QA)、品質計画 (QP)、予測品質、継続的改善、サプライチェーン品質の側面から、品質 4.0 が品質管理慣行の改善に与える影響についての先行研究を網羅的にレビューしている。しかし、Saihi et al. (2023) は、「なぜ品質管理の側面を、品質制御、品質保証、品質計画、予測品質、継続的改善、サプライチェーン品質に分けたのか」についてはやや不明確である。

また、本稿では、Saihi et al. (2023) が提示している「品質 4.0 が品質管理慣行に与える影響」のごく一部を表 2 に整理してみたが、表 2 のように、Saihi et al. (2023) で指摘されている「品質 4.0 が品質管理慣行に与える影響」は、膨大な数がある。網羅的にピックアップした「品質 4.0 が品質管理慣行に与える影響」について、その共通点や相違点等を何かの軸での整理・分析が加わっていないため、議論はやや複雑になっている。

表 1 品質 4.0 の利用可能な技術とそれがバリューチェーンの各段階への影響

段階	利用可能な技術	品質 4.0 のバリューチェーンの各段階への影響
製造	・ 予測ツール ・ マシンビジョン品質管理 ・ デジタル標準操作手順 ・ 機械間通信、プロセスシミュレーション	・ 製造の可視性：プロセスや結果の監視・検出・分析・予測、問題の根本原因の迅速な特定、問題の予防的対処 ・ 製造の時間、労力、コストの削減、精度の向上
研究開発	・ シミュレーションテスト ・ AI ・ IoT に接続されたセンサー	・ アジャイル製品開発、設計と製造プロセスの品質保証 ・ 市場や顧客ニーズの変化の把握 ・ 故障の防止
サービス・アフターセールス	・ IoT	・ 故障予測サービス ・ 品質問題の遠隔診断 ・ 顧客サポートの強化
調達	・ デジタルダッシュボード	・ 品質などのデータの可視化 ・ 品質リスクの評価
物流・販売	・ ビッグデータの分析	・ 需要予測能力やサービス品質の向上
クロスファンクショナル	・ 上記の技術	・ 品質データの一元化 ・ エンドツーエンドの品質管理システム ・ 品質コストの透明性

出所：Küpper et al. (2019) をもとに筆者作成

表 2 品質 4.0 が品質管理慣行への影響

品質管理の側面	品質 4.0 が品質管理慣行への影響
品質制御	①リアルタイムの情報の取得, ②高度なタスクの高速処理, ③自動, 継続的, リアルタイムの監視とアラート, ④新しい技術と検査ツールの利用可能性, ⑤早期障害検出と自己適応技術, ⑥品質関連の原因の特定, ⑦調整能力の向上, ⑧以前は不可能だった新しいタイプの欠陥の検出, ⑨QC は, 生産ラインで即座に行うことができ, 個別の計測は必要なくなる, ⑩データを 100% 記録し, 100% の制御を保証する, ⑪プロセスの「その場」修正の可能性, ⑫ビッグデータ分析とクラウドソリューションを使用したデータ主導型の意味決定の改善, ⑬拡張現実技術は, グラフィカルな指示を表示し, 検査手順についてユーザーに指導することで, 検査に使用できる, ⑭AI 技術が目視検査をサポート, ⑮ML 技術を使用した潜在的な制御不能な状況に関するモデルのトレーニング, ⑯AI および ML 技術を使用した是正措置の推奨
品質計画	①エンドツーエンドの統合により, 顧客の仕様の収集, ②現場での顧客体験と製品の性能に関するフィードバックの獲得
品質保証	①文書管理プロセスの自動化, ②QMS 文書化の新しい方法
予測品質	①不良・品質予測と設備故障の早期診断, ②データ主導の品質予測によって促進されるプロセス改善, ③故障の自動予測と意思決定ができる接続された自己学習マシン, ④エラーの予測可能性と継続的最適化, ⑤最終製品が仕様を満たすかどうかを早い段階で予測する
継続的改善	①製品レベル, プロセス・レベル, ビジネス・パフォーマンス・レベルで継続的改善の基礎を提供する完全に統合された生産システム, ②製品の使用状況, パフォーマンスおよび問題について収集されたデータを使用して, 将来の製品の機能強化に貢献する, ③継続的改善とさらなるイノベーションを促進する適切な修復のための推奨事項の提供, ④高度なデータ分析を使用して, 品質改善のためのより迅速で信頼性の高い意思決定を行う
サプライチェーン品質	ピア間の信頼の構築, リアルタイムでの情報共有, ピア間のセキュリティと透明性の確保, ピアの信用度の正確な評価, トランザクションの時間的およびコスト的効率の向上, 生産のトレーサビリティの確保

出所: Saihi et al. (2023) をもとに筆者作成

(3) Markatos & Mousavi (2023)

Markatos & Mousavi (2023) は, 「品質 4.0 の各技術がそれぞれ品質管理にどのように貢献するか」という視点で先行研究をレビューしている。同氏によると, 第 1 に, ビッグデータによって, 産業界は異質で大量のデータを活用すると同時に, 製造プロセスを改善するために必要なデータを区別できるようになった。ビッグデータの活用により, 従来と比べると高度なレベルでのデータ分析が可能になった。

第 2 に, IoT を通して, 我々の周りにあるかなりの数のアイテムが何らかの形でネットワークに接続される。IoT により, 垂直方向と水平方向の両方における製造のあらゆる側面のデジタル統合と自動化が可能になる。この仕組みの

実現には, 生産プロセスの自動化だけでなく, 特にプロセスが標準化されている領域におけるコミュニケーションとコラボレーションが必要となる。

第 3 に, プラントの運用では, リアルタイムのデータを利用して, 機械, 製品, 人間を含む物理世界に合致する仮想モデルを作成するために, シミュレーションの利用が増加している。これにより, 機械のセットアップに必要な時間が短縮され, 製品の品質が向上する。

第 4 に, クラウドコンピューティングは, システム間の接続と情報のタイムリーな転送を担うため, 生産時間を最適化することができる。

第 5 に, 拡張現実 (Augmented Reality: AR) に基づいたシステムは, 従業員にリアルタイム

の情報を提供できるため、作業者は、修理が必要な実際のシステムをみながら、特定の部品を交換する方法についての修理指示を得ることができる。

第6に、自律型ロボットとサイバー・フィジカル・システムは、非常に複雑な製造工程に採用される可能性があり、その結果、故障やヒューマンエラーの要因となる事故の数を減らすことで製造品質を向上させることができる (Markatos & Mousavi, 2023)。

以上のように、「品質4.0の各技術がそれぞれ企業の品質管理にどのように影響を及ぼすのか」というのは重要な視点だが、Markatos & Mousavi (2023) は各技術で実現可能なことを検討している一方、品質4.0の技術が企業の品質管理全体に対してどのように影響を与えるのかについては必ずしも体系的に整理していない。

(4) Sader et al. (2021)

Sader et al. (2021) は、品質4.0の定義と、それに関連する機能、技術、応用分野、課題と成功要因という視点から先行研究を検討した上で、従来の品質管理慣行と品質4.0の相違点をまとめている (表3)。

同氏によると、品質4.0には、検査活動の自動化、結果のデジタル化、および結果の製造システム全体との統合という、3つの主要な機能がある。このような機能を実現するためには、ビッグデータ、接続性、コラボレーションおよびデータ開示などの品質4.0の技術が必要である。品質4.0の機能とそれをサポートする技術は、製造、研究開発、物流と販売、サービスとアフターセールス、調達とサプライチェーン、意思決定プロセスという段階に応用できる。しかし、ビッグデータ、接続性、コラボレーションおよびデータ開示は技術として捉えられるの

表3 従来の品質管理慣行と品質4.0の相違点

伝統的品質管理実践	品質4.0	期待される進歩
統計的品質管理とサンプリング検査	瞬時、リアルタイム、工程内の検査・監視システム	製造不良やプロセス不適合への対応時間の短縮
統計分析と通常のデータ収集・分析手法の活用	事前的や事後的な品質手法ではなく、ビッグデータシステムやAI技術を活用し予測する	目に見えない要因を察知し、未来の行動を予測する力
紙、ペーパーレス、文書形式やスライドによる電子フォーマットのデータ提示	スマートデバイスと現場のスマートでダイナミックな画面の活用	リアルタイムの情報提供と推奨される是正措置
検査などの品質技術や方法の結果は、利害関係者に手渡しで伝える	結果は知識として、他の部門やサプライヤーを含む全ての利害関係者に伝達されている	リーン品質手法の推進と品質コストの最小化
品質専門家は品質管理の中心	品質4.0技術に支えられた品質のマネジメントの中心的な役割を果たすのは、依然として品質専門家	品質管理の役割とパフォーマンスの向上、主な焦点は戦略的な問題にあり、その貢献はかけがえがないもの
サプライヤーの品質の把握は品質問題が発生した際の報告に基づいている	サプライヤーは供給品の品質に関与し、その場所から生産上の問題解決に貢献できる	リーン生産と物流管理技術、特に倉庫と在庫管理の強化
生産における顧客の関与は、アフターセールスサービスに限定される	顧客は品質貢献者であり、製造プロセスに関与している。製品は、品質に関するデータをメーカーに送信できる	顧客満足度を高め、さらなる品質フォローアップにより、品質やプロセスを強化できる

出所：Sader et al. (2021) をもとに筆者翻訳

かという疑問はある。

さらに、表 3 の従来の品質管理慣行と品質 4.0 の相違点についても、伝統的品質管理実践として指摘されている内容には必ずしも一般論化されていない内容がある。例えば、「品質専門家は品質管理の中心である」、「サプライヤーの品質の把握は、品質問題が発生した際の報告に基づいている」などの指摘は必ずしもこれまでの日本企業の品質管理慣行と一致していない。

3.2.2 本稿の視点と分析

上記のように、これまでの研究では、品質 4.0 が品質管理業務を構成する「様々な仕事（工程）」に与える影響については議論されているが、品質 4.0 の技術は何か、品質 4.0 を構成する技術変化は何か、品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理にどのように影響を及ぼすのかについては必ずしも十分に検討されていない。その結果、議論がやや複雑になっている。

本稿では、品質 4.0 の技術は何か、品質 4.0 を構成する技術変化は何か、品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理にどのように影響を与えるのかという視点で品質 4.0 が企業の品質管理に与える影響について理論的に検討する。

(1) 品質 4.0 の技術とその定義

品質 4.0 の技術について数多くの研究が指摘をしているが、研究者の議論の間にはコンセンサスが未だに存在しない。例えば、Radziwill (2018) は、AI、ビッグデータ、ブロックチェーン、深層学習、実現技術（センサー、アクチュエーター、RDID、IPv6）、機械学習とデータサイエンスという 6 つの品質 4.0 の技術を提案した。Jscob (2017) は、品質 4.0 の技術を、ビッグデータ、接続性、コラボレーションおよびデータの開示という 4 つのカテゴリーにまとめた。Pagliosa et al. (2021) は体系的な文献レビューにより、IoT、CPS、クラウドコンピューティング、ビッグデータ、水平／垂直統合、高度なロボット工学、拡張現実、シミュレーション、積層造形といった品質 4.0 の主要な技術を 9 つ特定した。

第 4 次産業革命は、サイバー・フィジカル・システムを中心とした新しい産業革命を意味する (Olsen & Tomblin, 2020)。サイバー・フィジカル・システムとは、物理的な現実の世界のデータを収集し、これをコンピューター上の仮想空間に大量に蓄積・解析し、その結果を物理的な現実の世界にフィードバックするというサイクルをリアルタイムで回すことで、システム全体の最適化を図る仕組みである (経済産業省他, 2015)。この物理システムとデジタルシステムの融合は、IoT、AI、機械学習、深層学習、自律型ロボット、シミュレーション、拡張現実、仮想現実 (Virtual Reality: VR)、その他の関連技術などによって推進されている。

このように、サイバー・フィジカル・システムを通して、IoT や AI、クラウドコンピューティングなどの技術によりビッグデータのリアルタイムの収集・分析・共有・保存が可能になる。数年前、高度なセンサー、接続ツール、データストレージ、高いコンピューティング能力などの最新技術の利用コストが高かったため、そのような技術の導入は避けられていた。現在、これらの技術は安価になったため、広く使用されるようになりつつある (Nyendick, 2017)。

ブロックチェーン、3D プリンティングなどの第 4 次産業革命の技術も企業の品質管理に貢献できる。例えば、ブロックチェーンは、データ品質、トランザクションの品質、そしてトレーサビリティを向上させることができる (Kuhn et al., 2018; Antony et al., 2022a)。ただ、ブロックチェーン、3D プリンティングなどの技術のメリットに言及した研究は非常に限られている (Saihi et al., 2023)。

本稿では、紙幅制限のため、品質 4.0 の技術を、CPS、IoT、ビッグデータ、AI・機械学習・深層学習、自律型ロボット、シミュレーション・拡張現実・仮想現実、クラウドコンピューティングといった技術に限定する。それぞれの定義を表 4 にまとめている。

表4 品質4.0の各技術の定義

品質4.0の各技術	定義
CPS	物理的な現実の世界のデータを収集し、これをコンピューター上の仮想空間に大量に蓄積・解析し、その結果を物理的な現実の世界にフィードバックするというサイクルをリアルタイムで回すことで、システム全体の最適化を図る仕組み（経済産業省他，2015）
IoT	人工物をセンサーと RFID（非接触の IC タグ）による無線通信などでネットワークにつなげたシステム（Kevin, 1999）
ビッグデータ	大量・高速・多様な情報資産を意味し、その価値を高めるために特定の技術や分析手法を必要とする（Ward & Barker, 2013）
AI	人工的に作られた人間のような知能、ないしそれを作る技術（松尾，2015）
機械学習	AI のプログラム自身が学習する仕組み（松尾，2015）
深層学習	データをもとに、コンピューターが自ら特徴量を作り出すこと（松尾，2015）
自律型ロボット	作業環境や状況に適応して自らの判断で自律的に行動を行うロボットシステムの総称（日本機械学会，2017）
シミュレーション	適切なソフトウェアを用いて、コンピューター上で、実際のシステムの挙動をまねるための手法や応用といった広範囲にわたる包括的な内容（高桑，2018）
拡張現実	関連するデジタル情報を導入することによって、現実世界の実体に対するユーザーの認識を現実環境に拡張する（Ashgar et al., 2020）
仮想現実	別の環境に存在するという包括的で感覚的な錯覚を完成させようとするハードウェアシステムとソフトウェアシステムの統合（Radianti et al., 2020）
クラウドコンピューティング	構成可能なコンピューティング・リソース（ネットワーク、サーバー、ストレージ、アプリケーション、サービスなど）の共有プールへのユビキタスで便利なオンデマンド・ネットワーク・アクセスを可能にし、最小限の管理作業またはサービスプロバイター間の相互作用で迅速にプロビジョニング及びリリースができるモデル（Mell et al., 2011）

出所：筆者作成

（2）品質4.0を構成する技術変化とそれが企業の品質管理に与える影響

品質4.0を構成する技術変化は、第1に、IoT や AI、クラウドコンピューティング等によるビッグデータのリアルタイムの収集・分析・共有・保存、第2に、AI や自律型ロボットによる製造・検査のより一層の自動化、第3に、シミュレーション・拡張現実・仮想現実による仮想的設計・製造・検査・製品の実現という3つのカテゴリーに分類できる。

（3）IoT, AI 等によるリアルタイムのビッグデータの収集・分析・共有・保存

IoT の出発点は、あらゆるもの（生活空間の消費財や住宅、パソコンやスマートフォン、工場の設備や仕掛品、その他何でも）にセンサーが付き、そこからデータが発信されるというこ

とである。そのデータがインターネット経由でクラウドコンピューティングにつながり、そこで AI など分析した結果が、モノあるいはそのユーザーにフィードバックされるというのが IoT の全体の基本形である（藤本，2017）。RFID（Radio Frequency Identification：非接触の IC タグ）、クラウドコンピューターなどの技術は、製品がどのようなプロセスや機械を通過したかに関するデータを保存できる（Sader et al., 2021）。このように、IoT により、製造ネットワーク（インテリジェントセンサーと人間を含む）のグローバルな可視化を実現し、データ理解に基づいてリアルタイムで行動を起こすことを可能になる（Olsen & Tomlin, 2020）。

つまり、IoT, AI, クラウドコンピューティング、センサー、RFID 等の技術により、調

達・企画・設計・製造・検査・物流・販売・アフターサービス段階等のあらゆる段階でのリアルタイムのビッグデータの収集・分析・共有・保存が可能になる。

この技術変化により、第1に、調達段階では、サプライヤー企業とのビッグデータのリアルタイムの収集・分析・共有により、原材料・部品のトレーサビリティと透明性の向上、問題の早期発見・早期解決・リアルタイムの情報共有、監査機能の自動化（データの記録・保存・データベース化）が可能になる。

第2に、企画・設計段階では、顧客とのビッグデータのリアルタイムの収集・分析・共有により、顧客の使用状況や故障状況の把握、市場や顧客のニーズの調査、顧客の企画・設計への参加が可能になり、その結果、より正確な顧客ニーズの評価と顧客ニーズへの対応力が向上できる。

また、サプライヤー企業とのデータのリアルタイムの収集・分析・共有により、サプライヤー企業の企画・設計段階への参加が容易になり、その結果、原材料・部品の品質問題の早期解決につながる。

さらに、企業内での部門間のビッグデータのリアルタイムの収集・分析・共有により、企画・設計品質の問題の早期特定・解決にもつながる。

第3に、製造段階では、仕掛品や設備にセンサーを付けることで、生産の遠隔診断・遠隔操作、欠陥品や設備故障の早期発見・早期診断・早期解決が可能になる。

第4に、物流・販売の段階では、製品のトレーサビリティと透明性の向上、監査機能の自動化、物流企業や販売企業とのリアルタイムの情報共有により問題の早期発見・早期解決が可能になる。

第5に、アフターサービスの段階では、市場や顧客とのリアルタイムのデータの収集・分析・共有により、顧客の使用状況や故障状況の把握、品質問題の遠隔診断、欠陥・障害状況の顧客へのフィードバック、故障・耐用年数の予

測が可能になる。

(4) AI や自律型ロボットによる製造・検査のより一層の自動化

AI とは、人工的に作られた人間のような知能、ないしそれを作る技術である（松尾, 2015）。AI という言葉がはじめて登場したのは、1956 年の夏に米国東部のダートマスで開催された伝統的なワークショップである。AI は、これまでブームと冬の時代を繰り返してきた。現在進行中の第3次 AI ブームの主役は、機械学習と深層学習である。機械学習とは、AI のプログラム自身が学習する仕組みである（松尾, 2015）。深層学習とは、データをもとに、コンピューターが自ら特徴量を作り出すことである（松尾, 2015）。AI・機械学習・深層学習は、上記のビッグデータの分析以外に、目視検査のサポート、画像診断等以前不可能だった欠陥品の検出（e.g. Saihi et al., 2023）を通して、企業の品質管理に貢献することもできる。

自律型ロボットとは、作業環境や状況に適応して自らの判断で自律的に行動を行うロボットシステムの総称である（日本機械学会, 2017）。製造におけるロボットの活用は決して新しい概念ではない。かつては、ロボットは特殊な作業を行うためにあらかじめプログラム化されていた。しかし、センサー、ネットワーク、クラウドコンピューティングの最新技術により、ロボットは環境の変化に対応できるようになった（Ashgar et al., 2020）。同氏によると、ロボットは、環境の変化に対応し、クラウドから情報にアクセスしてタスクを遂行することが可能になり、より自律的・協調的で柔軟的な存在になっている。自律型ロボットは、より効率的で正確な方法で必要なタスクを達成できる（Bahrin et al., 2016）。

また、人間の作業員が制限されている場所で、安全に重点を置いた作業をする際に、自律型ロボットを活用することができる（Vaidya et al, 2018）。さらに、自律型ロボットは、非常に複雑な製造工程に採用される可能性があり、その結果、故障やヒューマンエラーの要因となる

事故の数を減らすことで製造品質を向上させることができる (Markatos & Mousavi, 2023) と指摘される。

以上のように、AI や自律型ロボットにより製造と検査のより一層の自動化が可能になり、人間による製造・検査コストの排除、ヒューマンエラーの排除、製造・検査の精度の向上、抜き取り検査の廃止につながる。

(5) シミュレーション、拡張現実、仮想現実による仮想的設計・製造・検査等の実現

シミュレーションとは、適切なソフトウェアを用いて、コンピュータ上で、実際のシステムの挙動をまねるための手法や応用といった広範囲にわたる包括的な内容を指す (高桑, 2018)。シミュレーションプログラムは、新しい設計製品、プロセスおよびサービスの動作、パフォーマンスをテストおよび評価したり、既存のものを改善したりするために使用される。

拡張現実とは、関連するデジタル情報を導入することによって、現実世界の実体に対するユーザーの認識を現実環境に拡張することである (Ashgar et al., 2020)。同氏によると、拡張現実とは、サイバートレーニング、不慣れなタスクの実行、必要に応じて作業者に空間情報を提

供するなど、製造業において応用可能である。拡張現実に基づいたシステムは、従業員にリアルタイムの情報を提供できるため、作業者は、修理が必要な実際のシステムをみながら、特定の部品を交換する方法についての修理指示を得ることができる (Markatos & Mousavi, 2023)。

仮想現実とは、別の環境に存在するという包括的で感覚的な錯覚を完成させようとするハードウェアシステムとソフトウェアシステムの統合である (Radianti et al., 2020)。仮想現実の活用による品質 4.0 は、仮想検査の利点を提供する。工場管理者は仮想現実を使用して製造プロセスや生産ラインの構成をシミュレーションし、危険な状況を特定できるようになる (Manga & Taifa, 2023)。

以上のように、シミュレーション・拡張現実・仮想現実を通して、製造開始前に製品や製造プロセスを仮想的にシミュレートできるため、最高の設計品質と製造品質を保証できる。最終製品が仕様を満たすかどうかを早い段階で予測することも可能になる。

上述のことをまとめると、品質 4.0 を構成する技術変化とそれが企業の品質管理に与える影響を表 5 のように整理することができる。

表 5 品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理に与える影響

品質 4.0 を構成する技術変化	品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理に与える影響
IoT や AI 等によるビッグデータのリアルタイムの収集・分析・共有・保存	企業内各部門をはじめ、サプライヤー企業、顧客企業等の関係者の品質管理への参加がより簡単になる
	あらゆる段階での欠陥品や故障などの問題の予測・早期発見・早期診断・早期解決により、工程での品質の作りこみと継続的改善に貢献できる
	品質管理全体のトレーサビリティと透明性の向上、監査機能の自動化が可能になる
	より正確かつ迅速な顧客や市場のニーズの把握、顧客の使用状況や故障状況の把握、欠陥や故障状況の顧客へのフィードバック
AI や自律型ロボットによる製造・検査のより一層の自動化	これまで不可能だった製造・検査が可能になる→人間による製造・検査のコスト削減、製造・検査精度の向上、ヒューマンエラーの排除→工程での品質の作りこみと検査の精緻化に貢献できる
シミュレーション・拡張現実・仮想現実による仮想的設計・製造・検査・製品の実現	設計品質、製造品質の保証 品質問題の予測・早期解決

出所：筆者作成

まず、IoT、AI、クラウドコンピューティング等の技術により品質管理のあらゆる段階のリアルタイムのビッグデータの収集・分析・保存が可能になることで、第1に、企業内各部門をはじめ、サプライヤー企業、顧客企業等の関係者の品質管理への参加がより簡単になる。第2に、あらゆる段階での欠陥品や故障などの問題の予測・早期発見・早期診断・早期解決により、工程での品質の作りこみと継続的改善に貢献できる。第3に、ビッグデータの品質管理のあらゆる段階でのリアルタイムの共有・保存により、品質管理全体のトレーサビリティと透明性の向上、監査機能の自動化が可能になる。第4に、より正確かつ迅速な顧客や市場のニーズの把握、顧客の使用状況や故障状況の把握、欠陥や故障状況の顧客へのフィードバックが可能になる。

次に、AIや自律型ロボットによる製造・検査のより一層の自動化をすることで、これまで不可能だった製造・検査が可能になり、人間による製造・検査のコスト削減、製造・検査精度の向上、ヒューマンエラーの排除などにつながる。これらが結果的に、工程での品質の作りこみと検査の精緻化に貢献できる。

最後に、シミュレーション、拡張現実、仮想現実による仮想的設計・製造・検査・製品の実現が可能になることで、その結果、設計品質、製造品質の保証が可能になる。また、品質問題の予測・早期解決にもつながる。

以上のように、第4次産業革命の技術を活用することで、従来の品質管理慣行を改善できる。したがって、本稿では、「第4次産業革命の技術を従来の品質管理慣行と統合した結果」という品質4.0の第1のアプローチの定義を採用したい。

3.3 品質 4.0 を導入する動機・利点

品質4.0の技術は、従来の品質管理慣行を改善できるということが理論的に明確になったが、では、実務の中で企業が品質4.0を導入する動機・利点は何だろうか。品質4.0を導入す

る動機・利点についての実証研究（e.g. Sony et al., 2020; Sony et al., 2021; Antony et al., 2020; Antony et al., 2022a）も近年、盛んになっている。ただ、研究初期段階にあるため、必ずしも十分に検討されていないという課題がある。

表6では、品質4.0を導入する動機・利点についてのいくつかの研究を整理している。Antony, Sonyの研究グループは、近年、企業が品質4.0を導入する動機・利点について実証研究を積み重ねて分析の精緻化を図ろうとしている。また、調査対象企業の本社所在地、所属する産業、企業規模などの違いによって、品質4.0を導入する動機・利点についても相違点が見られる。表6に挙げられているすべての要因は、企業が品質4.0を導入する動機・利点となり得る。

しかし、筆者の知り得る限り、これまで米国企業や欧州企業などを研究対象とした品質4.0を導入する動機・利点についての実証研究の蓄積はあるが、日本企業を対象とした実証研究はほとんどなかった。周知のように、これまでの日本企業で行われる品質管理の慣行と欧米企業で行われる品質慣行の慣行とは必ずしも共通ではない。日本企業にとって品質4.0を導入する動機・利点は何かを今後実証研究を通して明確にしていく余地がある。

3.4 品質 4.0 の導入・実現の先行要因

品質4.0の導入・実現の重要な成功要因・準備要因・課題についての研究も最近、盛んになっている。表7では、品質4.0の導入・実現の先行要因についての先行研究を整理している。

品質4.0の導入・実現の先行要因として、①品質4.0の投資コストと費用対効果の有無、②セキュリティの問題、③財務リソースの有無、④訓練された熟練労働者などの人的リソースの有無、⑤現在の品質管理のレベルなど管理・技術リソースの有無、⑥品質4.0についての知的リソースの有無、⑦品質4.0に向けたビジョンと戦略の有無、⑧品質4.0に向けた組織文化の有無、⑨トップマネジメントのサポートの有

表6 品質4.0を導入する動機・利点

著者 (出版年)	論文のタイプ、サンプル数、 調査企業本社所在国・地域	品質4.0を導入する動機・利点
Sony et al. (2021)	実証研究 質的研究 (N=50, 米国, 欧州, ブラジル)	①信頼できる正確な情報, ②データ主導の意思決定, ③顧客満足度の向上, ④生産性の向上, ⑤長期的視点のコストと時間の節約
Antony et al. (2020)	実証研究 質的研究 (欧州)	①顧客に高品質の製品とサービスを提供する, ②顧客へのサービス提供の迅速化とヒューマンエラーの削減, ③データの処理・分析・記録の簡素化, ④透明性のあるプロセスの作成, ⑤コスト削減, 効率と安全性の向上
Antony et al. (2022a)	実証研究 質的研究 (N=12, ドイツ, 米国, インド, イギリス, イタリア, トルコ)	①ビッグデータツール, ②データ分析の改善, ③顧客満足, ④目視検査, ④リアルタイムのデータ取得, ⑤品質チェックの自動化, ⑥ムダの削減, ⑦エラー防止, ⑧サービス分野のデータ, ⑨予測的な分析, ⑨リーンとのシナジー, ⑩紙の削減, ⑪環境, ⑫リアルタイムデータの獲得, ⑬プロセスの改善, ⑭意思決定
Antony et al. (2023b)	実証研究 質的研究 (N=11, 米国, カナダ, オランダ, イギリス, ベルギー, デンマーク, インド)	①品質の向上, ②コストの削減, ③信頼できるデータによる問題の解決, ④健全で効率的な意思決定, ⑤迅速な信頼性の高いデータ収集
Antony et al. (2023a)	実証研究 量的研究 (N=147, 米国, アジア, 欧州)	①ビッグデータの処理, ②信頼できるデータ, ③生産性向上, ④長期的にはコストと時間の節約, ⑤顧客満足度の向上, ⑥精度が向上し, エラーが減少する, ⑦意思決定の改善, ⑧より迅速で透明性のあるプロセス
Maganga & Taifa (2022)	実証研究 量的研究 (N=90, タンザニア)	①顧客満足, ②製品改善, ③プロセスと継続的改善, ④ムダの削減, ⑥意思決定の支援, ⑦透明性の向上, ⑧紙の削減, ⑨品質チェックの自動化, ⑩仮想検査の支援, ⑪トレーサビリティ, ⑫データ品質の改善, ⑬データ分析の改善, ⑭サービス分野のデータ, ⑮エラー防止の支援, ⑯環境データとライブデータの取得, ⑰予測分析の支援, ⑱リーンとのシナジー, ⑲ビッグデータツールの提供, ⑳人工知能の議論

出所：先行研究をもとに筆者作成

無, ⑩品質4.0をサポートするリーダーシップの有無, ⑪品質4.0についての教育・訓練や報酬の有無, ⑫サプライヤー企業の理解・協力の有無, ⑬顧客の理解・協力の有無, ⑭電力やインターネットなどのインフラの有無, ⑮政府の支援の有無といった要因が数多くの先行研究で指摘された。その中で, ①～②は品質4.0の特性要因である。③～⑪までの要因は企業内部の要因である。一方, ⑫～⑮の要因は企業外部の要因である。すなわち, 品質4.0の導入・実現の先行要因は, 第1に, 品質4.0の特性(コスト, 費用対効果, セキュリティ), 第2に, 企

業内部要因(人的・財務的・技術的・知的リソース, ビジョンと戦略, 組織文化, トップマネジメントのサポート, リーダーシップ, 教育・訓練, 報酬), 第3に, 企業外部要因(サプライヤー企業, 顧客企業, 政府, インフラ)という3つのカテゴリーに分類できる。

表7のように, 品質4.0の導入・実現の先行要因について, これまで理論研究が多く蓄積されてきたが, 一方で, 実証研究は未だにあまり多くない。Sony, Antonyの研究グループによる品質4.0の導入・実現の先行研究についての質的研究が中心となっている。筆者の知り得る限

表 7 品質 4.0 の導入・実現の先行要因

著者 (出版年)	論文タイプ(サンプル数, 企業所在地)	品質 4.0 の導入・実現の先行要因
Sony et al. (2020)	理論研究	①ビッグデータの処理, ②規範的な分析の改善, ③効果的な垂直, 水平およびエンドツーエンドの組織への品質 4.0 の使用, ④戦略的優位性のために品質 4.0 を活用する, ⑤品質 4.0 のリーダーシップ, ⑥品質 4.0 のトレーニング, ⑦品質 4.0 のための組織文化, ⑧品質 4.0 に対するトップマネジメントのサポート
Thekkootte (2022)	理論研究	①データ, ②分析, ③接続性, ④コラボレーション, ⑤APP の開発, ⑥スケーラビリティ, ⑦コンプライアンス, ⑧組織文化, ⑨リーダーシップ, ⑩品質 4.0 のトレーニング
Sader et al. (2021)	理論研究	①人事関連, ②組織面, ③技術面と経営面, ④セキュリティ, ⑤社会的, 技術的, 科学的, 政治的課題
Kumer et al. (2021)	理論研究	①人: リーダーシップ, 文化, 能力。②プロセス: 統合, 管理システム, コンプライアンス。③技術: データ, 分析, 接続性, スケーラビリティ
Maganga & Taifa (2023)	理論研究	①電力供給の信頼性, ②高速なインターネット, ③政府の政策・戦略・計画, ④品質 4.0 の標準化したフレームワーク/ロードマップ, ⑤品質 4.0 の知識と認識, ⑥訓練, ⑦文化変化, ⑧財務能力: 投資コスト, ⑨組織の品質文化, ⑩品質 4.0 に対するトップマネジメントのサポート, ⑪品質 4.0 をサポートするリーダーシップ, ⑫統合, ⑬ビジョンと戦略, ⑬熟練労働者と品質 4.0 のスキル, ⑭実現可能な技術, ⑮データ管理のキャパシティ
Asghar et al. (2020)	理論研究	発展途上国にとっての課題: ①インフラ, ②訓練された熟練労働者の不足, ③拡張性, ④資金調達
Sony et al. (2021)	実証研究 質的研究 (N=50, 欧州と北米)	課題: ①導入には初期費用がかかる。②リソースの不足。③品質 4.0 の実装に関する知識の欠如。④助長的な組織文化。⑤競争優位性の不明瞭 準備要因: ①トップマネジメントのサポート, ②品質 4.0 に向けた組織文化, ③リーダーシップ, ④ビジョンと戦略, ⑤品質 4.0 に関する知識と認識, ⑥顧客中心の組織, ⑦サプライヤー管理, ⑧トレーニングと報酬
Antony et al. (2022a)	実証研究 質的研究 (N=12, ドイツ, 米国, インド, イギリス, イタリア, トルコ)	重要な成功要因: ①トップマネジメントのサポート, ②組織文化, ③リーダーシップ, ④ビジョンと戦略, ⑤品質 4.0 の知識と認識, ⑥顧客中心のアプローチ, ⑦サプライヤーの管理, ⑧教育・訓練 課題: ①品質 4.0 の知識と認識の不足, ②リソース (資金, 人員, 時間など) の不足, ③品質 4.0 を組織の戦略や目標とどのように結びつけるかわからない, ④高額な初期投資
Antony et al. (2023a)	実証研究 量的研究 (N=147, 米国, アジア, ヨーロッパ)	課題: ①リソース不足, ②品質 4.0 を企業の戦略および目標と結びつけることができない, ③品質 4.0 の利点の理解不足, ④高額な初期投資, ⑤現在の品質管理戦略と手法は既に良好な結果をもたらしているため, 品質 4.0 の必要性を感じない 準備要因: 経営トップのサポート, リーダーシップ, 品質 4.0 に向けた組織文化, 顧客の準備状況, 品質 4.0 に関する知識と認識, 品質 4.0 のビジョンと戦略, サプライヤーの準備状況, トレーニングと報酬
Maganga & Taifa (2022)	実証研究 量的研究 (N=90, タンザニア)	課題: ①電力供給の信頼性, ②政府の政策, 戦略と計画, ③高速なインターネット, ④財務体制, 投資コスト, ⑤品質 4.0 に対するトップマネジメントのサポート, ⑥品質 4.0 についての知識と認識, ⑦品質 4.0 に対するリーダーシップのサポート, ⑧データ管理の処理能力, ⑨品質文化, ⑩文化的変化, ⑪実現可能な技術 (AI, ML, 自律型ロボット)

出所: 先行研究をもとに筆者作成

り、これまで日本企業を対象とした実証研究はほとんどなかった。したがって、日本企業にとって品質 4.0 を導入・実現する先行要因は何かを実証研究を通して探索的に検討していくことは今後の研究課題の一つである。

3.5 小括

以上のことをまとめると、近年、品質 4.0 は新たな品質管理研究のトレンドになっている。その中で、品質 4.0 の定義、品質 4.0 の技術、品質 4.0 が企業の品質管理に与える影響、品質 4.0 を導入する動機・利点、導入・実現の先行要因についての研究は注目を浴びている。

3.1 では、品質 4.0 の定義についての先行研究を整理した。品質 4.0 の定義について 2 つのアプローチがあると指摘されてきたが、その共通点としては、品質 4.0 の技術は、企業の品質管理に影響を及ぼしていることがあげられた。品質 4.0 を「品質 4.0 の技術を従来の品質管理慣行と統合した結果」として捉えるアプローチは、品質 4.0 は、従来の品質管理慣行を置き換えるのではなく、品質 4.0 の技術を活用することで従来の品質管理慣行を改善することにつながると捉えていた。一方、品質 4.0 を品質管理の新しい第 4 の進化段階として捉えるアプローチは、新たな品質管理の段階を主張していた。

3.2 では、品質 4.0 が企業の品質管理に与える影響についての先行研究を整理したうえで、品質 4.0 の各技術の定義、品質 4.0 を構成する技術変化、品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理に与える影響という観点から品質 4.0 が企業の品質管理に与える影響を整理した。品質 4.0 を構成する技術変化は、IoT、AI 等によるリアルタイムのビッグデータの収集・分析・共有・保存、AI や自律型ロボットによる製造・検査のより一層の自動化、シミュレーション・拡張現実・仮想現実による仮想的設計・製造・検査・製品の実現という 3 つのカテゴリーに分類できる。これらの技術変化を活用することで、従来の品質管理慣行を改善できる。したがって、本稿では、品質 4.0 を新たな品質管理の段

階として捉えるのではなく、従来の品質管理慣行との統合として捉えた。

3.3 では、品質 4.0 を導入する動機・利点についての先行研究を整理したうえで、先行研究に残された課題を明らかにした。品質 4.0 を導入する動機・利点についての研究は未だに研究の初期段階にあるため、理論的基盤は弱く、特に、実証的研究の蓄積は未だに多くない。日本企業を対象とした実証研究は筆者の知り得る限り、ほとんどなかった。したがって、今後日本企業を対象とした実証研究が求められる。

3.4 では、品質 4.0 を導入・実現する先行要因についての先行研究を整理した上で、先行研究で明らかになっていることと今後の研究課題を整理した。品質 4.0 の導入・実現の先行要因を、品質 4.0 の特性（コスト、費用対効果、セキュリティ）、企業内部要因（人的・財務的・技術的・知的リソース、ビジョンと戦略、組織文化、トップマネジメントのサポート、リーダーシップ、教育・訓練、報酬）、企業外部要因（サプライヤー企業、顧客企業、政府、インフラ）に分けて整理することができる。しかし、品質 4.0 を導入・実現する先行要因についての研究も、研究の初期段階にあるため、理論的基盤が弱い（Sader et al., 2021）。また、日本企業を対象にした実証研究は、筆者の知り得る限りほとんどなかった。今後、日本企業を対象とした実証研究も必要である。

4. 結 論

本稿では、最初に、文献レビューを通して、国内外の品質管理研究の動向を明らかにした。海外では、新たな品質管理研究のトレンドとして品質 4.0 が注目されているのに対して、日本では、近年品質管理研究が減ってしまっている。次に、新たな品質管理研究のトレンドとして注目されている品質 4.0 の定義、品質 4.0 が企業の品質管理に与える影響、品質 4.0 を導入する動機・利点、導入・実現の先行要因についての先行研究を体系的にレビューした上で、本稿で捉える品質 4.0 の定義、品質 4.0 の技術、

品質 4.0 を構成する技術変化、品質 4.0 の技術変化が企業の品質管理に与える影響、品質 4.0 を導入する動機・利点、導入・実現の先行要因について検討した。

最後に、結論的にいえることをまとめておきたい。一つ目は、本稿では、品質 4.0 を新たな品質管理の段階として捉えるのではなく、従来の品質管理慣行との統合として品質 4.0 を捉えたい。品質 4.0 を構成する技術変化は、IoT, AI, クラウドコンピューティング等によるリアルタイムのビッグデータの収集・分析・共有・保存、AI や自律型ロボットによる製造・検査のより一層の自動化、シミュレーション・拡張現実・仮想現実による仮想的設計・製造・検査・製品実現という 3 つのカテゴリーに分類できる。これらの技術変化を調達、企画・設計、製造、検査、物流・販売、アフターサービスなどの段階に活用することで、IoT, AI, クラウドコンピューティング等の技術により品質管理のあらゆる段階のリアルタイムのビッグデータの収集・分析・保存が可能になり、第 1 に、企業内各部門をはじめ、サプライヤー企業、顧客企業等の関係者の品質管理への参加がより簡単になる。第 2 に、あらゆる段階での欠陥品や故障などの問題の予測・早期発見・早期診断・早期解決により、工程での品質の作りこみと継続的改善に貢献できる。第 3 に、ビッグデータの品質管理のあらゆる段階でのリアルタイムの共有・保存により、品質管理全体のトレーサビリティと透明性の向上、監査機能の自動化が可能になる。第 4 に、より正確かつ迅速な顧客や市場のニーズの把握、顧客の使用状況や故障状況の把握、欠陥や故障状況の顧客へのフィードバックが可能になる。次に、AI や自律型ロボットによる製造・検査のより一層の自動化により、これまで不可能だった製造・検査が可能になり、人間による製造・検査のコスト削減、製造・検査精度の向上、ヒューマンエラーの排除などにつながる。これらが結果的に、工程での品質の作りこみと検査の精緻化に貢献できる。最後に、シミュレーション、拡張

現実、仮想現実による仮想的設計・製造・検査・製品の実現が可能になり、その結果、設計品質、製造品質の保証が可能になる。また、品質問題の予測・早期解決にもつながる。したがって、品質 4.0 の技術を活用することで、従来の品質管理慣行を改善できる。

二つ目として、品質 4.0 を導入する動機・利点についての研究は最近盛んになっているが、未だに研究の初期段階にあるため、理論的基盤は弱いことがわかった。特に、実証的研究の蓄積は未だに多くない。日本企業を対象とした実証研究は筆者の知り得る限り、ほとんどなかった。今後、日本企業を対象とした実証研究が求められる。

三つ目として、品質 4.0 を導入・実現する先行要因についての研究も近年注目を浴びているが、未だに研究の初期段階にあるため、必ずしも十分に検討されていない点が指摘できる。本稿では、先行研究で指摘されている品質 4.0 の導入・実現の先行要因を、品質 4.0 の特性（コスト、費用対効果、セキュリティ）、企業内部要因（人的・財務的・技術的・知的リソース、ビジョンと戦略、組織文化、トップマネジメントのサポート、リーダーシップ、教育・訓練、報酬）、企業外部要因（サプライヤー企業、顧客企業、政府、インフラ）に分類した。ただ、これまで日本企業を対象とした実証研究は筆者の知り得る限り、ほとんどなかったため、今後、日本企業を対象とした実証研究は必要である。

以上のように、品質 4.0 の定義、技術、品質 4.0 の技術が企業の品質管理に与える影響、品質 4.0 を導入する動機・利点、導入・実現の先行要因についての研究は近年盛んになっているが、未だに研究の初期段階にある。特に、日本企業を対象とした実証研究はほとんどなかった。

近年、日本の製造業の第 4 次産業革命やデジタル化への対応の遅れなど日本の製造業に対する悲観論が目立つが、そもそも日本の製造業の第 4 次産業革命やデジタル化への対応は遅れて

いるのか、それは全体的な傾向なのか、産業別、企業別にみると相違点がないのか、第4次産業革命やデジタル化への対応が進んでいる企業と進んでいない企業の相違点は何かなどを明確にする必要がある。

品質4.0についても、そもそも日本企業と欧米企業で行われてきた品質管理の慣行に相違点がある。しかし、これまで日本企業にとって、①品質4.0の技術変化は企業の品質管理にどのように影響を与えるのか、②品質4.0を導入する動機・利点は何か、③品質4.0を導入・実現する先行要因は何か、については、必ずしも先行研究では十分に検討されていない。そのため、今後品質4.0についての日本企業を対象とした実証研究が求められる。その際に、組立企業・部品企業、素材業、プロセス産業などの製造技術の違いの影響、大企業と中小企業といった企業規模の影響、組立企業と部品企業といった企業間関係の影響も考慮する必要がある。

さらに、日本企業だけではなく、海外諸国の企業も研究対象に入れ、国際比較研究を通して、品質4.0の技術変化が企業の品質管理に与える影響、品質4.0を導入する動機・利点、導入・実現の先行要因を実証的に精緻化した上で、要因間の関係性を明確にして、品質4.0についての国際的に一般化できる分析枠組みを構築することも今後の重要な研究課題である。

参考文献

- Aldag, M. C. & Eker, B. (2018, November). What is quality 4.0 in the era of industry 4.0? 3rd International Conference on quality of life. University of Kragujevac.
- Allcock, A. (2018). Nikon talks quality 4.0. *Machinery*, 176 (4276), 49-50.
- ASQ. (2018). Industry and quality 4.0: Bringing them together. <https://www.qualitymag.com/articles/95011-industry-and-quality-40-bringing-them-together>.
- Antony, J., Sony, M. & Cudney, E. (2020). Quality 4.0: motivations and challenges from a pilot survey in European firms, future factory. [Online]. available at: <https://www.thefuturefactory.com/blog/53>.
- Antony, J., McDermott, O. & Sony, M. (2022a). Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study. *The TQM Journal*, 34 (5), 1169-1188.
- Antony, J., Sony, M., Furterer, S., McDermott, O. & Pepper, M. (2022b). Quality 4.0 and its impact on organizational performance: an integrative viewpoint. *The TQM Journal*, 34 (6), 2069-2084.
- Antony, J., Sony, M., McDermott, O., Jayaraman, R. & Flynn, D. (2023a). An exploration of organizational readiness factors for Quality 4.0: an intercontinental study and future research directions, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40 (2), 582-606.
- Antony, J., McDermott, O., Sony, M., Toner, A., Bhat, S. & Cudney, E. A. (2023b). Benefits, challenges, critical success factors and motivations of Quality 4.0 — A qualitative global study. Benefits, challenges, critical success factors and motivations of Quality 4.0 — A qualitative global study. *Total Quality Management & Business Excellence*, 34 (7-8), 827-846.
- Ashgar, S., Rextina, G., Ahmed, T. & Tamimy, M. I. (2020). The fourth industrial revolution in the developing nations: challenges and road map. *Commission on Science and Technology for Sustainable Development in the South*, 102, 1-44.
- Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. H. N. & Talib, M. F. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, 78, 6-13.
- Chiarini, A. (2020). Industry 4.0, quality management and TQM world. A systematic literature review and a proposed agenda for further research. *The TQM Journal*, 32 (4), 603-616.
- Enke, J., Meister, M., Metternich, J., Genne, M. & Brosche, J. (2017). Der weg zur lean quality 4.0. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112 (9), 612-615.
- 藤本隆宏. (2017). 『現場から見上げる企業戦略論—デジタル時代にも日本に勝機はある—』. 角川新書.
- 潘宝燕. (2021a). 「中国企業の品質管理の多様性」『国際ビジネス研究』, 13 (1), 15-25.
- 潘宝燕. (2021b). 「品質管理に関する新たな分析フレームワークの構築—中国企業を事例として—」

- 『日本経営学会誌』, 47, 61-73.
- 石川馨. (1981). 『日本の品質管理－TQC とは何か－』. 日科技連出版社.
- Jacob, D. (2017). Quality 4.0 impact and strategy handbook—getting digitally connected to transform quality management, available at: https://www.sas.com/content/dam/SAS/en_us/doc/whitepaper2/quality-4-0-impact-strategy-109087.pdf.
- 経済産業省 (2016). 「新産業構造ビジョン～第4次産業革命をリードする日本の戦略～産業構造審議会中間整理」. 2016年4月27日 https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shinsangyo_kozo/pdf/008_05_01.pdf
- 経済産業省・厚生労働省・文部科学省編 (2015). 「2015年版ものづくり白書」. 一般財団法人経済産業調査会.
- 経済産業省・厚生労働省・文部科学省編 (2022). 「2022年版ものづくり白書」. 一般財団法人経済産業調査会.
- Kevin, A. (1999). The definition of IoT.
- Kumar, R., Ganesh, L. S. & Rajendran, C. (2022). Quality 4.0—a review of and framework for quality management in the digital era. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39 (6), 1385-1411.
- Kuhn, M., Nguyen, H.G., Otten, H. & Franke, J., (2018). Blockchain-enabled traceability—securing process quality in manufacturing chains in the age of autonomous driving, in: 2018 IEEE international conference on technology management, operations and decisions (ICTMOD), Presented at the 2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD), 131-136.
- Küpper, D., Knizek, C., Ryeson, D., Noecker, J. & Quality, E. T. (2019). *Quality 4.0 takes more than technology*. Boston Consulting Group.
- Le, H., Nguyen, M., Yan, W. Q. & Nguyen, H. (2021). Augmented reality and machine learning incorporation using YOLOv3 and ARKit, *Applied Sciences*, 11 (13), 6006.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.
- Maganga, D. P. & Taifa, I. W. R. (2022). Quality 4.0 transition framework for Tanzanian manufacturing industries. *The TQM Journal*, ahead-of-print No. ahead-of-print.
- Maganga, D. P. & Taifa, I. W. R. (2023). Quality 4.0 conceptualisation: an emerging quality management concept for manufacturing industries. *The TQM Journal*, 35 (2), 389-413.
- 松尾豊 (2015). 『人工知能は人間を超えるか：ディープラーニングの先にあるもの』. KODOK-AWA.
- Mell, P. & T. Grance (2011). The NIST definition of cloud computing.
- 日本機械学会 (2017). 『機械工学事典』. 自律ロボットの定義.
- Nyendick, M. (2017). Qualität 4.0 -IT-Rückgrat für einen fertigungsintegrierten Qualitätsmotor. *ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111 (4), 167-168.
- Olsen, T. L. & Tomlin, B. (2020). Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22 (1), 113-122.
- Pagliosa, M., Tortorella, G. & Ferreira, J. C. E. (2021). Industry 4.0 and Lean Manufacturing: A systematic literature review and future research directions. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32 (3), 543-569.
- Radziwill, N. M. (2018). Quality 4.0: Let's get digital—the many ways the fourth industrial revolution is reshaping the way we think about quality. October.
- Radiani, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J. & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: design elements, lessons learned, and research agenda, *Computers and Education*, 147, 103778.
- Sader, S., Husti I. & Daroczi, M. (2021). A review of quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges. *Total Quality Management & Business Excellence*, 33 (9-10), 1164-1182.
- Saihi, A., Awad, M. & Ben-Daya, M. (2023). Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices—a systematic review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40 (2), 628-650.
- Sony, M., Antony, J. & Douglas, J. A. (2020). Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0 A narrative review of literature and future directions for research. *The TQM Journal*, 32 (4), 779-793.
- Sony, M., Antony, J., Douglas, J. A. & McDermott, O.

- (2021). Motivations, barriers and readiness factors for Quality 4.0 implementation: an exploratory study. *The TQM Journal*, 33 (6), 1502-1515.
- Souza, F. F. d., Corsi, A., Pagani, R. N., Balbinotti, G. & Kovalski, J. L. (2021). Total quality management 4.0: Adapting quality management to Industry 4.0. *The TQM Journal*, 34 (4), 749-769.
- 高桑宗右エ門. (2018). 「IoT・インダストリー 4.0 環境下における生産システムのシミュレーション」. 『オペレーションズ・リサーチ』, 63(4), 234-240.
- Thekkootte, R. (2022). Enabler toward successful implementation of Quality 4.0 in digital transformation era: A comprehensive review and future research agenda. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39 (6), 1368-1384.
- Vaidya, S., Ambad, P. & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 -a glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238.
- Ward, J. S. & Barker, A. (2013). Undefined by data: a survey of big data definitions. arXiv preprint arXiv: 1309. 5821.

(受理 2023 年 6 月 5 日)