

ケミカルトナープラントにおけるデジタルトランスフォーメーション

Digital Transformation in Chemical Toner Plants

武政 奨* 松井 一幸* 宮川 将士* 高橋 直希* 小林 翔太*
Susumu TAKEMASA Kazuyuki MATSUI Masashi MIYAKAWA Naoki TAKAHASHI Shota KOBAYASHI
鍵田 浩志* 百田 健一* 渡邊 好夫**
Hiroshi KUWATA Kenichi MOMOTA Yoshio WATANABE

要 旨

国内の製造業では、これまで高い生産技術力を基に高品質で低コストなものづくりを進めってきたが、労働人口の減少による人財不足など様々な問題を抱えており、デジタル技術を活用した解決と、それらを通じたデジタルトランスフォーメーションが求められている状況にある。リコーのケミカルトナープラントにおいても、熟練技術者に依存した生産など同様の問題を抱えており、これに対して、「工場の“はたらく”をスマートに」をコンセプトにデジタル技術を活用した課題解決を推進してきた。品質予測による生産条件の自動制御、異常検知技術を活用したプラントの自動運転、その他の施策により作業を効率化し、効率化後のプラント操業を円滑に進めるためのシステムであるDXプラットフォームを構築することで、生産に必要な工数の80%を削減することができた。また、これらの活動を支えるデジタル人財の育成についても紹介する。

ABSTRACT

The domestic manufacturing industry has promoted high-quality, low-cost manufacturing through advancements production technology but has faced various problems such as a shortage of human resources due to the declining working population. Ricoh's chemical toner production plant has encountered similar problems, due to its reliance on skilled engineers. One promising solution to these problems is digital transformation. Thus, we have built a DX platform which streamlines work through automatic control of production conditions on the basis of quality prediction, automatic plant operation using anomaly detection technology, and other measures. With this platform we were able to improve the operating efficiency of the plant and reduce the person-hours required for production by 80%. In addition, this paper introduce the development of digital human resources as part of our activities.

* CMC事業本部 第二トナー事業センター
2nd Toner Business Center, CMC Business Division

** 元リコー 技師長
Former Ricoh Chief Engineer

1. 背景と目的

1-1 製造業における課題とDXの普及

国内の製造業では、これまで高い生産技術力に基づき高品質で低コストなもののづくりを進めてきたが、団塊の世代の退職による技術伝承の断絶や、少子高齢化社会における労働人口の減少など様々な問題を抱えている。生産技術力の維持や競争力の確保にIoT技術やAI技術などデジタル技術活用による解決と、それを通じたデジタルトランスフォーメーションが期待されている状況にある¹⁾。

1-2 リコー沼津事業所におけるDX推進

リコーCMC事業本部では複写機やプリンタで消費されるトナーやインク、感光体、感熱紙などサブ

ライ製品の生産を行っており、トナー製造を行うケミカルプラントやインクカートリッジの組立ラインなど様々な生産設備を有している。これらの生産においても、高品質で低コスト、環境にやさしい製造が求められている一方、誤操作により災害や損失に直結するミスの許されないストレスの多い作業、熟練者のノウハウに依存した生産、加えてこれらの業務を支える人財不足など様々な問題を抱えていた。

これらをデジタル技術の活用により改善すべく、Fig. 1に示す「工場の“はたらく”をスマートに！」をコンセプトにSafety, Automation, Connectivity, Intelligenceの視点でDX化を進めてきた。以下ではリコー独自の重合トナーであるPxPトナーの製造プラントで展開している技術と施策について解説する。

～工場の“はたらく”をスマートに！～

Be Smart & Excellence Operation

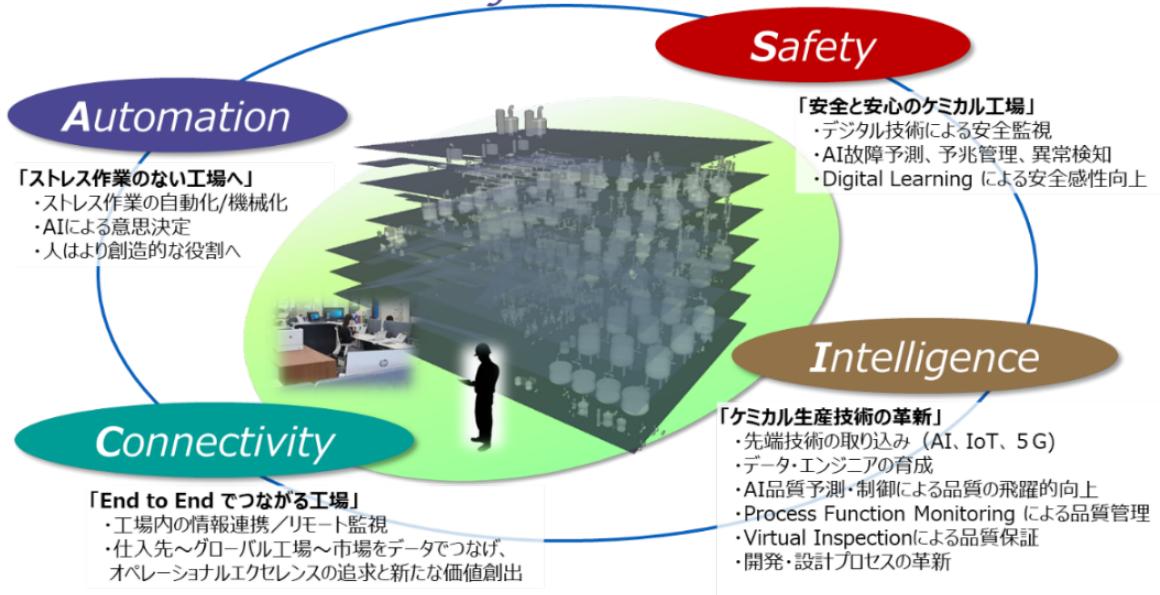


Fig. 1 DX promotion concept.

1-3 PxPトナー生産における課題

リコーPxPトナーはポリエステル重合を用いたケミカルトナーの一種であり、原材料投入から製品完

成まで様々な加工工程を経て生産される。これまでPxPトナーの品質制御には、トナー品質管理者による手動のフィードバック制御が用いられてきた。こ

の手動制御では、制御実行時点で取得できている数ロット前の品質測定値を参照し、品質に対して感度を持つ生産条件の操作量を決定する。このような制御方法では、トナー品質管理者の監視や操作量変更指示などに工数が多くかかるばかりでなく、品質管理者の経験差により、品質や工程が安定しないリスクも大きい。

こうした熟練技術者のノウハウやスキルに依存した生産から、設備設定など生産条件の変更や運転停止操作を自動で行う工場運転自動化、生産状況の監視や管理を自動で行う工場管理自動化を経て、最終的には工場の稼働をシステムが自律的に調整し最適化する工場自律化を目指して、Fig. 2に示すロードマップをもとに、各種の技術開発と展開を進めてきた。



Fig. 2 PxP Toner Plant DX Roadmap.

次節以降では、工場運転自動化フェーズにおける代表的な施策事例として、以下の(1)～(3)について紹介する。

(1) 品質予測と品質制御

機械学習による、粒子径や帶電性能などトナー品質の予測と生産条件の自動最適化。

(2) 異常検知と自動歩進

生産プロセスの異常検知、および監視業務と工場運転操作の自動化。

(3) リモート監視 (DXプラットフォーム)

生産情報をいつでもどこでも確認できるようにするとともに、様々なデバイスを活用した作業者支援。

そのほかにも、インライン計測と自動条件調整を組み合わせた自動化や、抜き取りサンプル測定をソフトセンサへ置き換える仮想検査化、VRを活用した安全施策等も実施している。また、これら技術開発とその展開を支えるための人財育成についても触れたい。

2. PxPトナー生産におけるDX事例

2-1 品質予測と品質制御

2-1-1 品質自動制御システム

従来の最終品質を確認して条件を調整するフィードバック制御では、調整する工程が上流になるほど調整してから結果が出るまでのリードタイムが長いため、品質不具合の発生から改善までの対応が遅れる。

この問題を解決するため、Fig. 3に示すような、原材料の物性データや設備の状態量、トナーの品質などの生産プロセスデータ集約システム (manufacturing process data collection system) と、品質予測モジュール (quality prediction module) と操作量算出モジュール (operating condition optimization module) で構成される品質自動制御システム (automatic quality control system) を開発した²⁾。品質予測モジュールでは、いくつかの機械学習手法の

中から最も安定した予測性能を示したRandom Forestを選定した。この機械学習モデルは、毎ロット逐次的に更新される。操作量算出モジュールでは、品質予測値を参照しながら、生産条件の操作量に対する品質の感度表をもとに操作量を自動算出し、工程に反映させることで生産条件を自動で最適化する。

Table 1は、主要な二つの品質の品質自動制御システム導入前後における工程能力指数と工程能力指数から推定される不良率を示している。両品質とも従来の手動フィードバック制御を大きく上回る工程能力指数が得られ、トナー品質管理者を介さずに従来以上の工程能力を持った品質制御システムが構築できた。

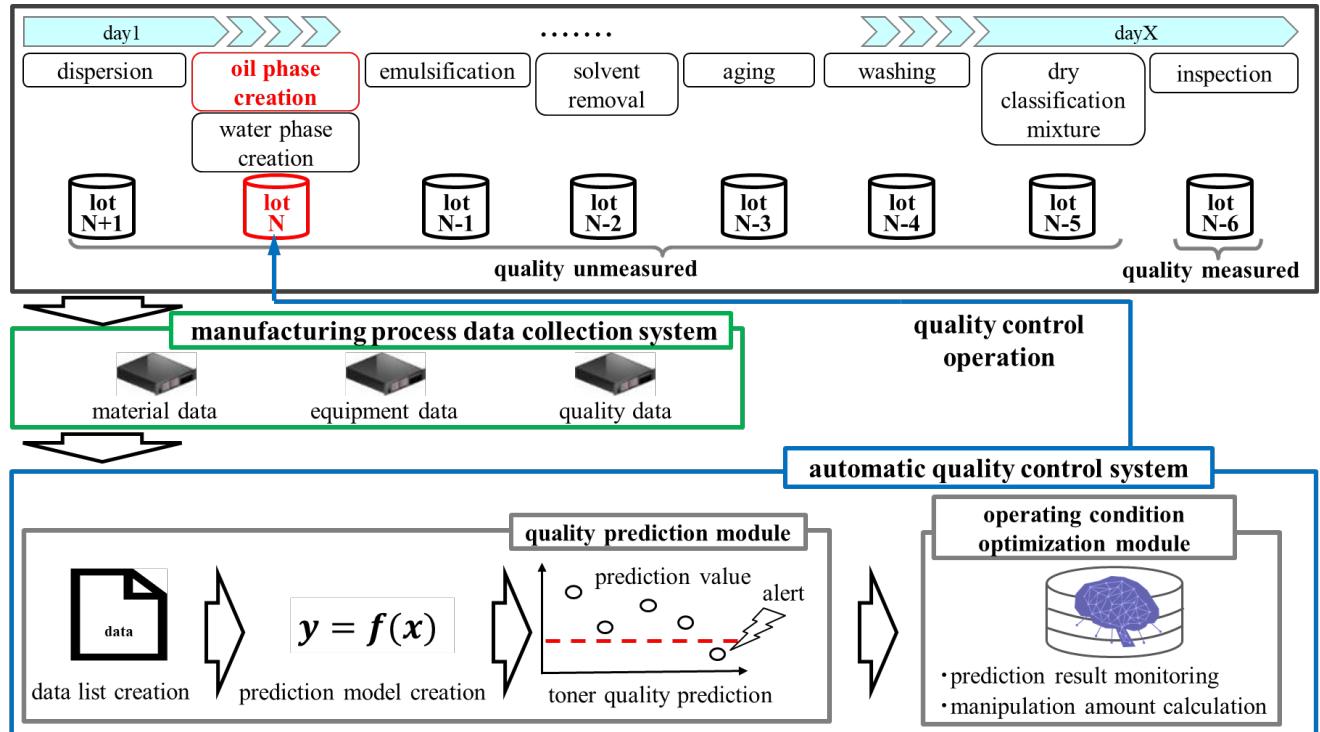


Fig. 3 Chemical toner manufacturing process and automatic quality control system (Takahashi et al., 2020).

Table 1 Process capability index and defect rate before and after introduction of the automatic quality control system.

項目	工程能力指数 (Cpk)		不良率 [%]	
	品質1	品質2	品質1	品質2
導入前 41ロット	1.07	1.41	0.133	0.0023
導入後 41ロット	1.28	1.49	0.012	0.0008

この品質自動制御システムでは逐次モデル更新を採用しているが、モデルが常に新しいデータで更新されるため、誤ったデータを学習した際に予測精度が低下するリスク、および誤った予測によって制御量が算出されるリスクが発生する。2-2節に記載の

異常検知手法を用いて、異常なデータによる誤学習を防止し、誤った制御が行われることを防いでいる。これにより、人の確認を経ずに直接生産設備に生産条件を反映するシステムが構築できた。

2-1-2 転移学習技術の開発

前述の品質自動制御システムにより、品質調整作業の自動化は実現されたが、その予測モデルの構築には、多くのサンプルデータを要する。一方、製造工程では、環境負荷低減や品質向上などを目的として、生産設備や原材料などの改良がしばしば行われており、その都度新しく予測モデルの再構築が求められ、この期間はシステムのダウントIMEとなる。

これを短縮するため、少サンプルで高性能な機械学習モデルを構築する技術として、転移学習を活用した。これは、データが豊富にあるソースドメイン（改良前）の知識を、対象とするターゲットドメイン（改良後）の学習に適用する技術である。種々の転移学習の方法の中で、特に、メンテナンスも容易で優れた性能の機械学習モデルを与える手法としてFEDA³⁾が知られている。

これは、両ドメインの構造が同じであることを前提とした手法であるが、これを両ドメインで構造が異なる場合でも適用可能とする、新たな手法（Frustratingly Easy Heterogeneous Domain Adaptation, FEHDA）を提案した⁴⁾。Fig. 4は、両ドメインを結

合した特徴空間の拡張方法の概要を示している。 $X_c^{(s)}$, $X_c^{(t)}$, $X_u^{(s)}$, $X_u^{(t)}$ は、それぞれ、両ドメインに共通の説明変数、各ドメインに固有の説明変数を示している。

この提案手法により、改良後のデータが少ない状態でも予測精度を満足するモデルの構築が可能となるため、データ蓄積期間を短くすることができ、システムのダウンタイムを40日から10日に短縮することが可能となった。この独自の転移学習技術は新規性と実用性が高く評価され、プロセスシステム工学の国際学会PSE2021+の論文に採択されるとともに、計測自動制御学会の2022年度技術賞⁵⁾を受賞した。

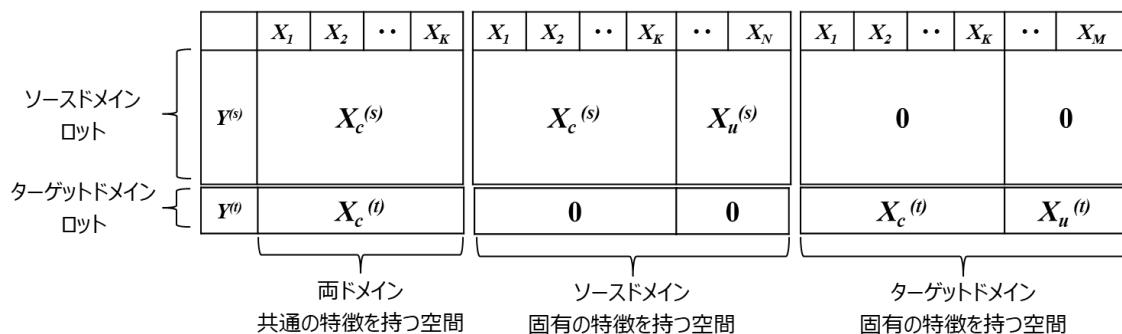


Fig. 4 Feature space expansion in FEHDA (Kobayashi 2022).

2-2 異常検知と自動運転

PxPトナープラントでは数万点のセンサデータや生産情報が日々生成、蓄積されているが、従来は生産上で重要な項目のみ監視、管理している状態であった。それでもそれら管理項目の確認に多大な工数がかかっていた。また、管理対象を限定しているため、一部の設備故障ではデータを有効に活用できず被害が顕在化するまで気が付かないことがあった。

この解決を目指して、異常検知システムの構築を行った。生産における時系列データを逐次学習し、過去のデータ推移から想定される範囲を逸脱したデータを異常として検出する傾向管理としての機械学習手法と、過去データ実績から発生頻度の低い範囲に入ったデータを異常として検出する実績管理と

しての機械学習手法の二つを組み合わせることで、精度良く異常値を検出し、かつ異常の原因について考察しやすい異常検知アルゴリズムを開発した。

これにより、Fig. 5に示すように、システムが生産情報の異常有無を自動で判定し、異常がない時には工程を自動歩進、異常があった場合のみ人に通知する運用とすることが可能となり、従来行っていた監視、確認作業の95%を削減した。



Fig. 5 Autonomous driving using anomaly detection.

また、設備故障の早期発見も可能となった。Fig. 6は通常67°C付近で推移している設備温度が50°C程度まで低下し、品質不具合が発生した時点で発覚した事例の温度推移と、このデータに対して異常検知システムを活用していた場合の判定結果を示しており、従来よりも2週間以上早く異常を検出できていたことが確認できる。

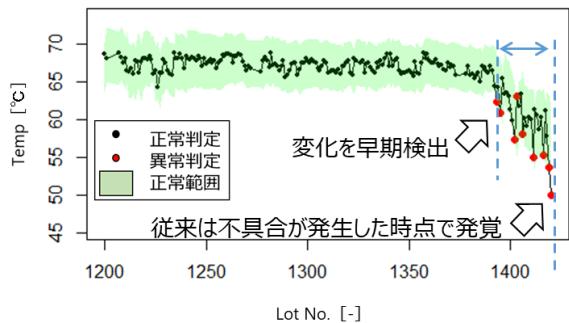


Fig. 6 Early detection of equipment failure by anomaly detection.

2-3 DXプラットフォームの構築

これまで述べてきた運転自動化の技術を工場に展開することで、従来作業の大幅な自動化が実現し、より少ない人数で工場の操業が行えるようになったが、一人が担当するオペレーション範囲は増大することとなる。PxPトナープラントの操作は集中制御室でSCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) を介して行うが、複数生産ラインの稼働状態を把握する際には非常に多くのモニタを横断的に確認する必要があるほか、現場作業中には他ラインでの異常情報発生に気が付きにくいことがあり、従来よりも作業負荷やストレスが増大する。また、多岐にわたる工程、設備における個々のノウハウ、経験を持った人財は限られており、トラブル発生時に対応が取りにくくなるといった側面もあった。

そこでFig. 7に示すように、工場のすべての情報を一括して確認できるダッシュボードを導入した。従来はラインごとに異なるモニタで生産進捗やアラーム、設備状態などの確認、操作を行っていたが、工場全体の進捗やアラームを一覧で確認できる画面

を構築し、更にその画面から詳細情報を容易に確認できるようにすることで、一つのモニタで工場全体の生産状況を確認できるようにした。

Fig. 8は、ダッシュボードの一画面である。これをWEBブラウザでの閲覧が可能なシステムとしていることで、スマートフォンを含む様々なデバイスからアクセスできるようになった。これにより、集中制御室から離れているタイミングでも状況を確認できるほか、技術部門メンバーや、在宅勤務中のメンバーが遠隔でアクセスできることで、不具合発生時にもリアルタイムな情報共有をしながら、有識者がサポートすることが可能となった。

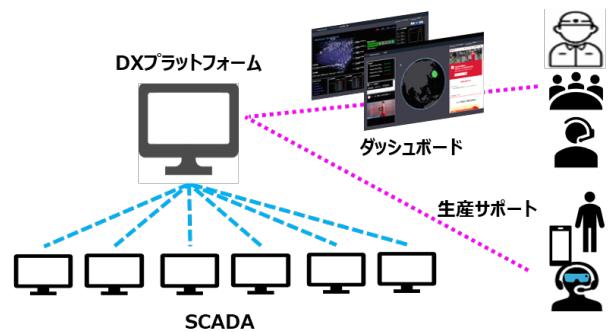


Fig. 7 DX platform.

更に基幹システムや業務アプリケーションと連携し、サンプル採取の時刻などオペレーションタスクのスケジュール自動作成、工場のアラートなどのスマートフォンへのプッシュ通知、MR技術を活用した手順ガイドやリモートアシストなど、効率的に生産をアシスト、サポートするDXプラットフォームを構築した。Fig. 9は、装置の前でスマートグラスと呼ばれるゴーグル型のMRデバイスを用いながら、操作手順を確認している様子である。

これら施策により、最終的には工場全体で作業の80%の自動化を実現した。



Fig. 8 Device-free remote monitoring system.



Fig. 9 Production assistance using MR devices.
(The figure is an image)

3. DX推進における人財育成

DX推進にはデジタル人財の育成が必須なことは言うまでもない。サプライ生産を預かるリコーCMC事業本部では、Fig. 10に示す「ドメイン」、「AI」、「IT」の三つの技術、知識の習得を必要と考えており、特に生産技術者自身がAI、IT技術を習得することでドメイン知識とAI技術の横断的な獲得を重視している。これにより社内のAI導入プロジェクトの多くを成功に導いてきた。

Table 2には、生産技術者のデジタルスキル習得のレベルの定義と施策を示す。レベル1、2の基礎的なレベルにおいては全社施策や市販コンテンツを活用して学ぶ一方、実業務での活用を進めるレベル3以上ではFig. 10に示した横断的なスキル獲得のため、

事業部門の特性を踏まえた、OJTを中心とした部門独自の教育プログラムを構築している。

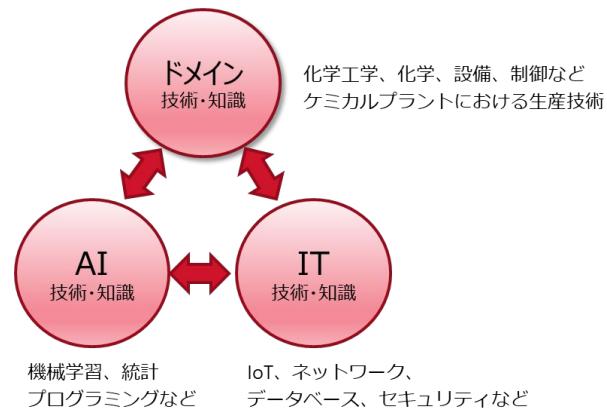


Fig. 10 Technical skills required for DX in chemical plants.

Table 2 Digital skill level definition and development measures.

項目	効果	施策内容
レベル5	先端技術を理解し活用できる	論文発表、学会参加 高度人財勉強会
レベル4	調査をしながら業務活用できる	
レベル3	理解しており、簡単な例なら実施できる	テーマ内実践 技術相談／交流
レベル2	指導を受ければ実施できる	全社基礎教育
レベル1	知識として知っている	社内外事例理解

教育プログラムは、技術・開発部門に限定せず、生産部門、スタッフ部門を含む全社員を対象としている。レベル3以上の高度人財育成においては実際の業務課題からテーマを設定し、社内外有識者との技術相談、交流を通じて自律的にテーマを推進できるスキルの習得を行う。これらの教育の受講者は上司と事前に計画を立てた上でアサインされ、業務の一環として取り組むことで、高い履修率で実施することができている。更にレベル4、5の技術者には学会参加論文発表を奨励している。これまでトップレベルの技術者による論文発表や学会表彰が、本人のレベルアップに加え、他の受講者のモチベーション

醸成につながり、デジタル技術活用およびスキル教育のスパイラルアップにつながっている。

4. 活動の成果と今後の課題

工場運転自動化により生産工数の80%削減を達成したほか、全施策によって得られた効果をTable 3に示す。

Table 3 Effect of deploying DX measures compared to before deployment.

項目	効果
生産必要工数	80%削減
生産能力	5%向上
残業時間 (プラント全体)	50%削減
有休取得率	100%達成
品質変動	10%抑制
定常時操作判断	80%削減

工場運転自動化を実現し、「工場の“はたらく”をスマートに」していくことで、はたらく人と機械の協働により、単純だがストレスのかかる作業が自動化され、人はより創造的な業務に集中することができる環境が形成され始めている。リコーが毎年行っている社員のエンゲージメント調査において、トナー生産工場のエンゲージメントスコアは、DX導入前は全社平均値を10%下回っていたが、DX導入後は逆に平均値より10%高くなった。

また、これらの活動が評価され、経済産業省、東京証券取引所および(独)情報処理推進機構が選定するDX銘柄2022にも選ばれた⁶⁾。

5. おわりに

本稿では、リコーのPxPトナープラントにおけるDX事例とその活動について紹介した。今後は、「工場の“はたらく”をスマートに」を目指してトナー工場のDXマスタープランにおける次なる課題である工場管理自動化、工場自律化に向けた開発に加え、デジタル技術の展開範囲を更に拡大し、仕入先様からお客様まで含めたサプライチェーン全体での革新を目指し活動を進めていく考えである。

謝辞

本研究を進めるに当たり、京都大学大学院情報学研究科教授 加納学様、株式会社明和eテック執行役員 佐藤敏明様には多くのご指導ご協力を賜りました。この場をお借りして深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省: 2022年版 ものづくり白書, <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2022/index.html> (accessed 2022-12-14).
- 2) 高橋直希ほか: 機械学習予測技術を用いたケミカルトナーの品質自動制御, *Ricoh Technical Report*, No. 44 (2020).
- 3) H. Daumé III: Frustratingly Easy Domain Adaptation, *Proceedings of the 45th Annual Meeting of ACL*, pp. 256-263 (2007).
- 4) S. Kobayashi et al.: Transfer Learning for Quality Prediction in a Chemical Toner Manufacturing Process, *Computer Aided Chemical Engineering* 49, pp. 1663-1668 (2022).
- 5) 計測自動制御学会: 2022年度計測自動制御学会 学会賞の贈呈, https://www.sice.jp/info/info_press/press_20221111-2.html (accessed 2022-12-14).
- 6) 経済産業省: 「DX銘柄2022」「DX注目企業2022」を選定しました!, <https://www.meti.go.jp/press/2022/06/20220607001/20220607001.html> (accessed 2022-12-14).