

自動連結切離しユニット「ACTDOM™」の商品開発

Product development for the "ACTDOM™" automatic connection and disconnection unit

中島 徹也^{※1}

Tetsuya NAKASHIMA

井口 真央^{※1}

Mao IGUCHI

製造業における労働人口減少の問題を解決するため、一部大手メーカーなどではAGV導入による搬送作業の自動化に取り組んでいるがさまざまな課題がある。けん引搬送を行うためには搬送台車の改造や、搬送台車との連結・切り離し作業は手作業で行うため十分な自動化が実現できない。そこで、AGVに取り付けることで、搬送台車のけん引搬送に必要な連結と切り離しの作業を自動化し、省人化・省力化に貢献するユニット「ACTDOM」を開発した。

In order to solve the problem of the decline in the working population in the manufacturing industry, some major manufacturers are working to automate conveyance work by introducing AGVs. However, there are various issues for this automation. In order to perform transportation by towing, it is necessary to modify the transportation trolleys and also the work to connect and disconnect the trolleys must be performed manually, which makes it impossible to achieve sufficient automation. We developed the "ACTDOM" unit in response to this issue. When installed on an AGV, the unit reduces the labor required by automating the connection and disconnection work necessary for the towing of transportation trolleys.

1. はじめに

昨今、省人化・省力化のニーズが高まり、AGV^{*1}・AMR^{*2}と呼ばれる無人搬送車の需要が高まっている。従来、物流の効率化や省人化を目的に導入されてきたAGVであったが、新型コロナの影響により非接触という観点からも製造業において導入に向けた取り組みが加速している。

搬送ロボットの日本市場規模は、2020年時点では328億円だったが、2030年に約1,012億円に達すると予測されている。AGV・AMRの導入数で見ると、図1に示す通り2022年には6450台ものAGV・AMRが導入されており、車両タイプ別では図2に示す通り2010年に35%程度であったけん引形の割合が、2019年には6割を超えている状況となっている。業種別では、製造業が約8割を占めている状況が2010年から続いており、今後も製造業向けが大きな割合を占めることが予想されている。また、2030年まで毎年導入台数が増加していくことが予想されている。

特に製造業を生業とする大手企業を中心にAGVの導入事例が増加しているが、その大多数を占めるけん引形（自動積載）のAGVは、我々が市場調査を行ったところ搬送の前後工程（搬送台車の連結と切り離しなど）が

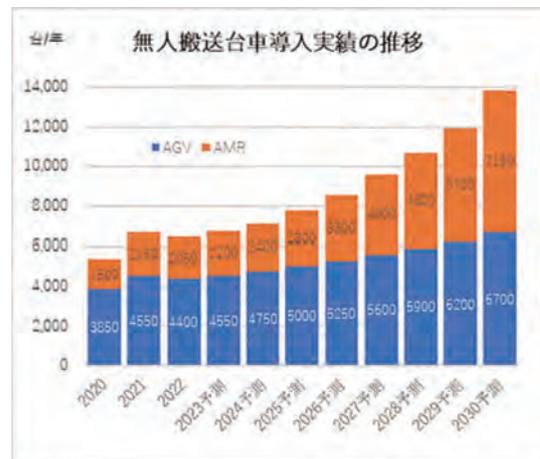


図1. 無人搬送台車導入実績の推移¹⁾



図2. 車両タイプ構成比²⁾

※1 モーションコントロール事業部 開発部



図 3. ACTDOM の外観

全に自動化されておらず、その作業を手で実施せざるを得ないことから、期待したほどの省人化が実現できないという課題があった。また、搬送可能な搬送台車の構造に制約があり、既存台車の改造や交換が必要になるなど、製造現場の負担が大きくなる課題もあった。

この課題を解決するために自動連結切離しユニット「ACTDOM」を開発した（図 3）。製造業で多く使われている搬送台車をそのまま使用し、自動で連結と切り離しを行うことで、十分な自動化が実現でき、省人化・省力化のニーズに応えることができる。

2. 開発コンセプト

2.1 台車搬送に必要な機能

AGV による台車搬送は大きく①連結②搬送③切り離しの各工程に分類できる。このうち①③は人手作業となる場合が多く、そのため台車の受け渡し場所に作業者を待機させる必要があった。これらを自動化しなければ省人化・省力化は望めない。

その他、けん引形 AGV を導入したユーザーが抱える問題は以下の通りと考える（図 4、5）。

- (1) 大小さまざまなサイズの搬送台車に対応できない
- (2) 手作業で重い搬送台車を AGV に連結するのが困難
- (3) 段差や傾斜のある路面では搬送が困難
- (4) 台車の切り離し場所は AGV の走行路上となり、放置すると後続 AGV の通行を妨げる

これらを解決するため、以下のコンセプトに基づいて開発した。

- (1) マーカを使用して搬送台車のサイズを認識できるようにする
- (2) 所定の位置に置かれた搬送台車の連結位置を検出し、自動で連結する
- (3) 搬送時は段差や傾斜があっても連結した搬送台車をスムーズに搬送する

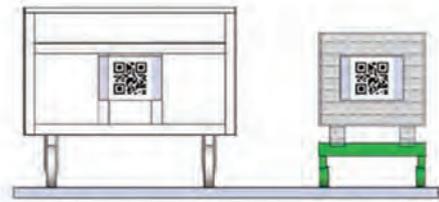


図 4. 搬送台車サイズの一例



図 5. ユーザーが抱える問題の一例

表 1. ACTDOM の製品仕様

サイズ	234 (W) × 626 (L) × 567 (H) mm
製品質量	約 26kg
けん引物重量	最大 600kg 相当
連結方式	把持
許容段差	10mm
許容傾斜	± 5 度
許容ロール	± 5 度
許容旋回角度	± 70 度
使用環境	屋内
電源	DC24V、DC5V
通信方式	TCP/IP *3
通信ケーブル	Ethernet *4 ケーブル

- (4) 切り離し作業では決められた位置に搬送台車をおさめて自動で切り離し作業を行う

2.2 製品の仕様

ACTDOM の製品仕様を表 1 に示す。

けん引物重量は、日本産業車両協会の調査³⁾より、搬送重量 300kg 以上 500kg 未満が全体の約 4 割の比率を占めているため、搬送台車重量を合わせた 600kg とした。

連結方式は、後述する後退整列駐車にて ACTDOM と搬送台車がなす角度 θ を測定するために、ACTDOM と搬送台車の連結部分を固定できる把持機構とした。

当社長岡京工場の観察およびユーザーへのヒアリング

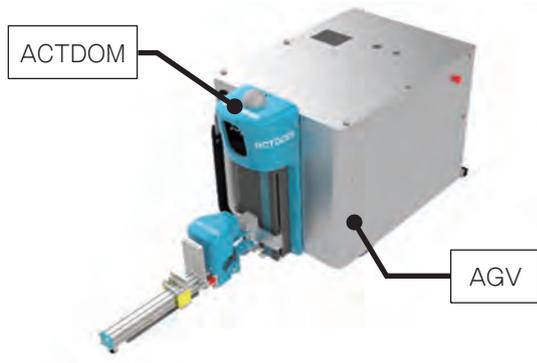


図 6. ACTDOM 付き AGV の外観

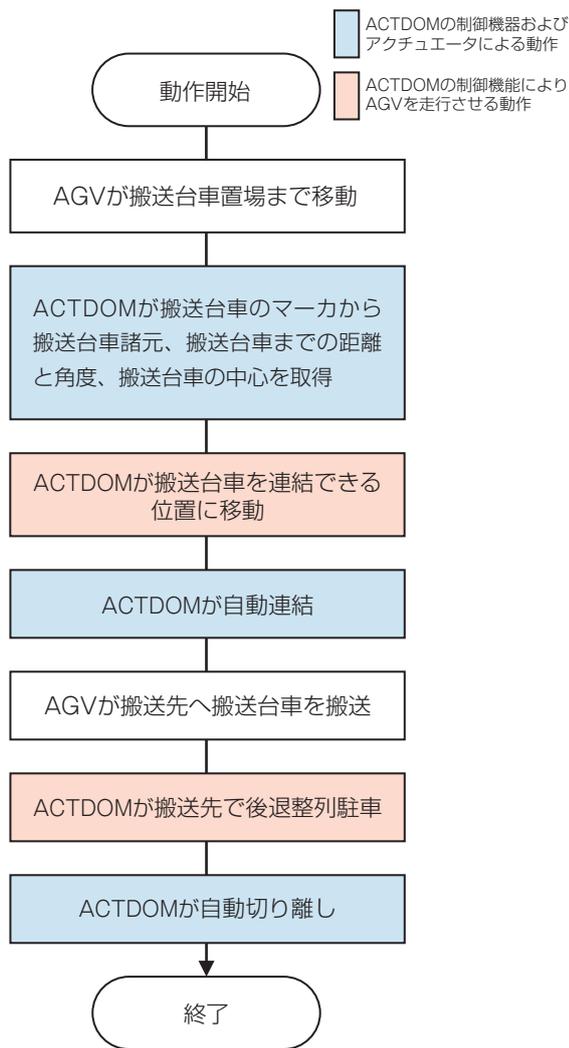


図 7. 動作フローチャート図

を行った結果、走行通路には段差や傾斜、うねりなどがあり、それらに対応する機構とした。

ACTDOMには制御機能があり、後述する連結・切り離しなどの動作において、ACTDOMがTCP/IP通信によりAGVの走行制御を行う。さらに、連結および切り離し動作は、搭載されたアクチュエータにより自動で行う。

図6に示す通り、ACTDOMをAGVに取り付けることで搬送の前後工程である搬送台車の連結と切り離しを自動化することができる。一連の搬送動作の概要をフローチャートに示す(図7)。

3. 要素技術開発

台車搬送の自動化を実現するための技術課題に取り組んだ5項目についてその結果を示す。

3.1 連結作業の自動化

3.1.1 位置検出機能

AGVと搬送台車を自動連結させる場合、従来はAGVとの移載点において搬送台車を精度よく停車させておく必要があり、そのために位置決めレールを設置するなどの対策が必要であった。また、AGV自体の繰り返し停止精度にも影響を受け、自動連結を失敗する事象や連結後の搬送に悪影響を与える連結状態となる。

そこで、ACTDOMに位置検出機能を持たせ、搬送台車置場まで移動したAGVと搬送台車連結位置までのX,Y方向および傾き ϕ を考慮した移動量を、画像処理結果から自動算出することとした。指定マーカを搬送台車に貼付し、これをACTDOMに搭載したカメラで画像処理を行うことで、ACTDOMと搬送台車までの距離とACTDOMから見た搬送台車の傾き、搬送台車の連結位置、および搬送台車の諸元(事前に登録する必要あり)を取得する(図8)。取得情報により、搬送台車連結位置までの走行経路を算出した上でACTDOMからAGVへ速度指令を送信し、自動でAGVを連結位置まで移動させる。

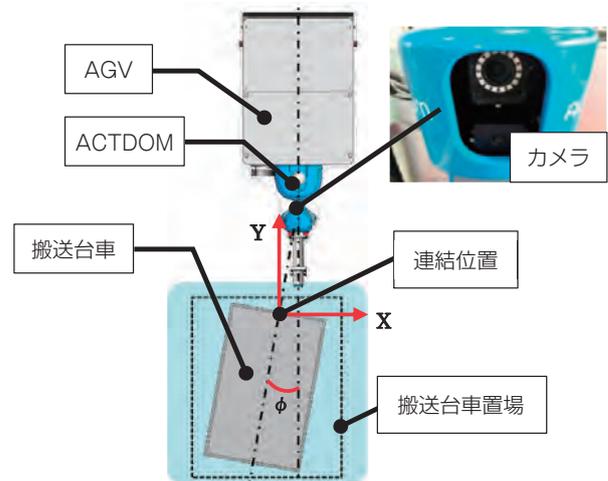


図 8. 位置検出機能

3.1.2 自動連結

位置検出機能により AGV を搬送台車連結位置まで移動させた後に、図9に示す通り昇降部と把持部のアクチュエータを制御して ACTDOM と搬送台車を連結する。

ここで、アクチュエータの制御は、事前登録した搬送台車の諸元を基にして行い、昇降部が台車の高さまで把持部を上昇させる。そして、把持部が台車フレームを挟み込むことで連結する（図10）。



図9. ユニットのアクチュエータ構成

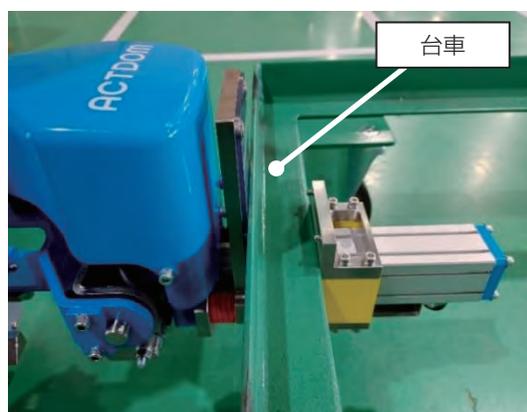


図10. 台車連結

搬送台車の種類ごとに指定マーカを貼り付け、それをACTDOMで読み取ることで、さまざまな搬送台車を保有するユーザーの現場でもAGV導入が可能となる。

3.1.3 ライン復帰

図11に示す通り、①AGVが誘導ライン上を走行し台車置場まで移動し、②位置検出・自動連結を行う際にAGVは誘導ラインから離脱する。搬送台車連結後は、③AGVを誘導ラインまで移動させるためにライン復帰し、④再び誘導ライン上を走行しAGVがけん引走行を行う。そこで、ライン復帰動作においても再びACTDOMが速度指令を送信し、AGVを誘導ラインまで走行させることとする。

位置検出機能により搬送台車連結位置までの移動量を算出していたので、ライン復帰時にも、この移動量分だけ移動させれば良い。搬送台車連結位置から誘導ラインまでの距離や搬送台車の諸元などからACTDOMはさまざまな搬送台車で、旋回時にAGVと搬送台車が干渉しない最適な経路を自動算出し、速度指令を送信しAGVを誘導ラインに復帰させる。誘導ラインに復帰した後は、AGVの運行管理のもと搬送作業を続行することができる。

3.2 段差・傾斜対応

製造業での搬送作業はさまざまな環境下での運用が想定される。資材倉庫や加工工場、組立工場が別の建屋であれば、建屋間の搬送が必要になる。この場合の走行通路には、うねりや凸凹といった平坦ではない場所がある。また、建屋の出入口には、スロープを施工していることが多い。そういった走行通路で搬送台車をけん引して走行できなければならない。そこでACTDOMは段差と傾斜に対応すべく、ロール・ピッチ・ヨー、Z方向（図12）に対する変位を吸収する機構を搭載した。

段差や傾斜を通過するときAGVと搬送台車の位置や姿勢が変化し連結部に負荷がかかる。ACTDOMは弾性部材を用いた変位吸収部（図13、14）を搭載したこと

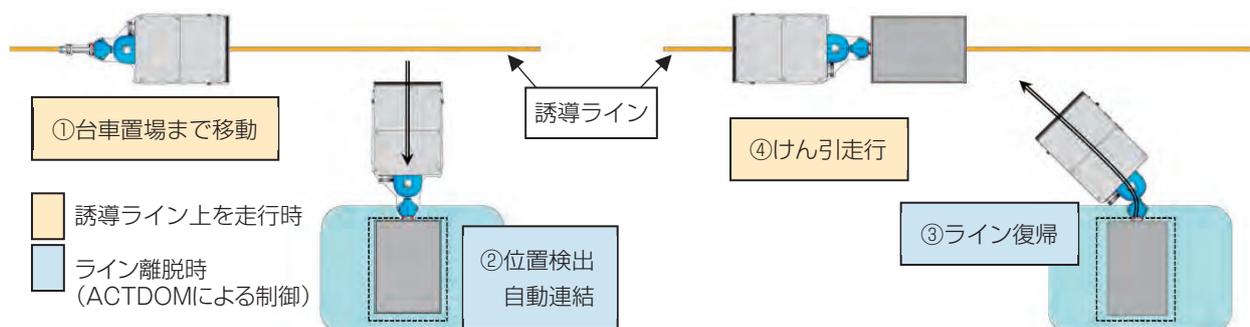


図11. 連結とライン復帰

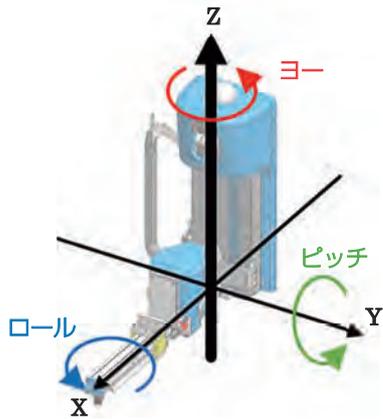


図 12. ロール・ピッチ・ヨー

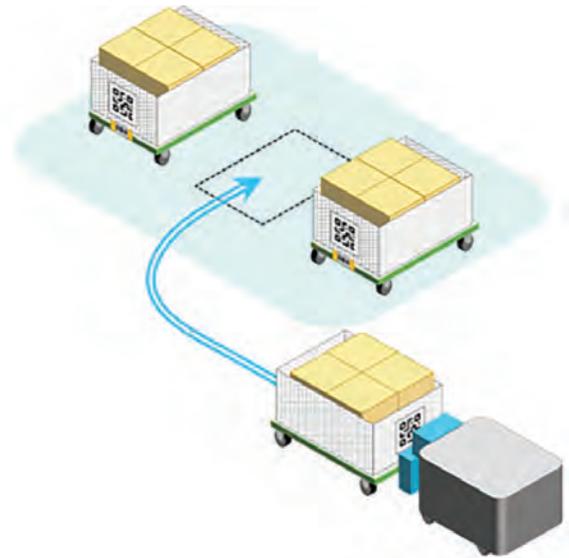


図 15. 後退整列駐車の走行経路イメージ

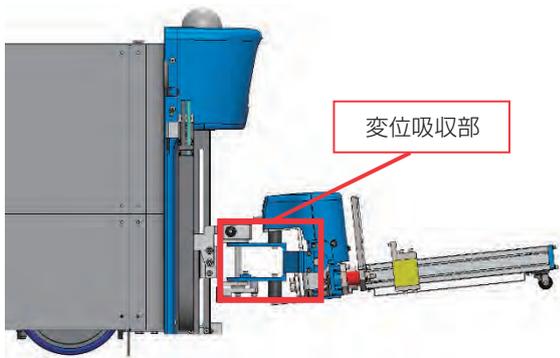


図 13. 変位吸収部

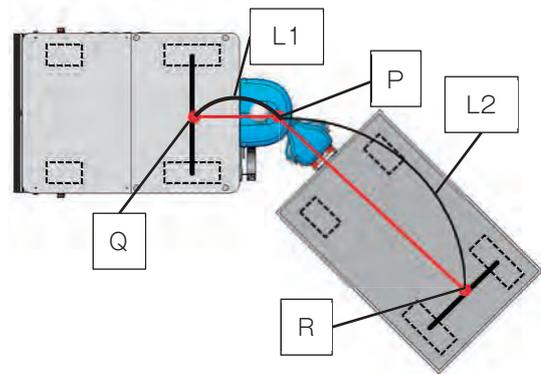


図 16. 後退整列駐車的主要寸法

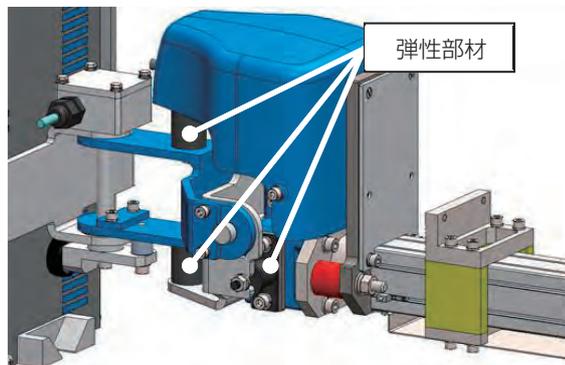


図 14. 変位吸収部詳細

により、段差や傾斜に合わせて回転、および上下移動することで変位を吸収する。これにより平坦ではない場所でも搬送することができる。

3.3 後退整列駐車機能

けん引形による搬送後の搬送台車の切り離しをする場合、搬送先で作業者が手作業で切り離しをするか、指定場所で自動切り離しをして作業エリアを通り抜けるなどのパターンが考えられる。しかし、前者は手作業による手間がかかり、後者は AGV が通り抜けするための広

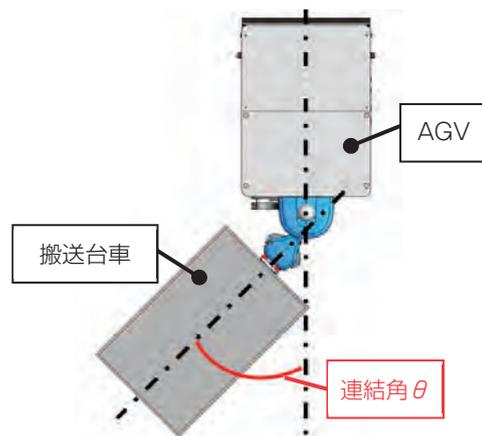


図 17. AGV と搬送台車の連結角 θ

いスペースが必要になる。できる限り省スペースかつ自動で切り離しをしたいということを考慮して、後退整列駐車を実現した (図15)。

後退整列駐車は、AGV、ACTDOM、搬送台車の主要寸法より、図16に示す通り点 P：旋回軸、点

Q：AGVの駆動輪中心、点R：搬送台車の固定輪中心の3点を結ぶ線分L1、L2の情報をもとに最適な走行経路を計算する。

ACTDOMが計算した後退整列駐車時の走行経路でAGVを走行させるため、ACTDOMの制御にてAGVに速度指令を送信する。ACTDOMにはAGVの車体走行方向の中心線に対して搬送台車の車体走行方向の中心線がなす連結角 θ (図17)を検出する機能を搭載しており、後退整列駐車時の旋回走行時に計算軌道を外れた場合はフィードバック制御により瞬時に軌道修正を行う。また、さまざまなサイズの台車が混在していても、決められた同じ位置に後退整列駐車するように旋回経路の半径を台車に応じて変更できる。自動で後退整列駐車から切り離し動作まで行うので、省人化・省スペース化に貢献する。

さらに、後退整列駐車時の応用として、建屋のエレベータと連動させ、後退整列駐車と同様の旋回走行でエレベータ内への搬送台車搭載、ならびに取出しを行うことも可能となる。これにより、他フロアへの荷の受け渡しも自動化が見込める。

4. 今後の課題

4.1 防水仕様への対応

現在は屋内仕様のみ確立した。建屋間搬送に、より幅広く対応できるよう既存商品に用いている防水技術を流用し、アクチュエータや制御機器収納部の防水仕様に取り組んでいく。

4.2 搬送重量の拡大

今回の開発では、搬送重量は市場の約4割を占める600kgけん引とした。今後は次に多い約2割を占める1t搬送の機種を開発しラインナップを拡大させ、ユーザーの用途に応じたユニットが提供できるようにしていく。

4.3 ターゲット市場の拡大

製造業を第一ターゲットとして開発コンセプトを設定し要素技術の開発を進めた。この技術を水平展開してターゲット市場を拡大させるため、市場調査を実施する。

5. おわりに

モーションコントロール事業部は、減速機、直動機器、軸継手、締結具、クラッチといった既存のパーツ商品だけでなく、制御技術を付加したユニット商品を開発

し変革成長を目指している。

人口の減少、高齢化が問題となる日本社会において、画像処理や走行経路の計算などによる自律制御技術を搭載した自動連結切離しユニット「ACTDOM」を市場投入して、搬送業務の省人化・省力化に貢献する。当社が解決を目指す社会課題の1つに「人にやさしい社会の実現」がある。今後も自動化を実現するさまざまなユニット開発を実行するために、技術力の向上に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 株式会社富士経済, ラストフロンティア!!工場物流における搬送ロボット (AMR) 導入実態と今後の方向性,2023,p.7
- 2) 一般社団法人日本産業車両協会, 第2回AGVSセミナー, 2021,p.12
- 3) 一般社団法人日本産業車両協会, AGVSセミナー,2020,p.20

用語解説

* 1 AGV (Automatic Guided Vehicle)

無人搬送車。磁気テープなどの誘導方式を用いて、搬送作業を行うロボット。

* 2 AMR (Autonomous Mobile Robot)

自律走行搬送ロボット。カメラ・センサーなどによるセンシング技術を活用して、周囲環境の地図をつくり搬送作業を行うロボット。

* 3 TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)

インターネットなどで利用されている通信プロトコル。

* 4 Ethernet

富士フィルムビジネスイノベーション株式会社の登録商標。

【特許登録】

金型カルテを用いた現場DX活性化に向けた改善

Improvement of activate DX using die records

戸松 雅弘^{※1}

Masahiro TOMATSU

石田 裕人^{※2}

Hiroto ISHIDA

嘉良 航汰^{※3}

Kota KARA

近年、世界中でデジタル技術を活用して組織やプロセスを変革する「DX」という言葉が普及している。当社においても情報のデータ化を進め、その中で業務プロセスを変えながらDXを生み出す推進活動を行っている。本稿ではその活動の中でも情報数が非常に多く調査分析に時間がかかっていた、当社製造工程の成形工程にて成形条件や治具、品質結果をまとめている金型カルテのシステム活用による効率化について報告を行う。

In recent years, the term "DX" has become popular worldwide as a term referring to the use of digital technology to transform organizations and processes. Our company is also promoting the conversion of information into data, including in activities to create DX while changing business processes. This report describes our efforts to improve efficiency in the blanking processes of our manufacturing processes, for which there is a very large amount of information and a long time was required for investigation and analysis. This was achieved through the utilization of a die records system that summarizes the blanking conditions, jigs, and quality results.

1. はじめに

製造工程のデジタル化（Digital Manufacturing、以下「DM」という）が進んでいる中、DMは今後のデジタルトランスフォーメーション（DX）を展開する上で不可欠であるとされている。製造業においてデータを活用するためには、情報をデータ化し人手による入力作業を排除すべきである。データの信頼性を確保することは重要であるが情報がデータ化されていない場合、作業は人に依存しデータの信頼性が損なわれる。そこで当社は情報をデータ化し、DXを成功させるために2023年度に新たな組織を立ち上げた。この新組織の目的は、自社の生産現場の改革を実現することにある。

本組織の設立目的は大きく二つあり、第一に自社工場におけるモノづくりの改革を図ることである。これには生産効率の向上や非効率な作業の排除が含まれる。第二に¹⁾自社の課題を解決するプロセスを通じて改善ノウハウを蓄積させデジタル人材を育成し、さらなるデジタル化を加速することである。これらの目的は将来的には自社だけでなく、日本全体の製造業の発展に寄与することを意図している。

当社では、この新組織によるいくつかの取り組みがす

で成果を上げており、DMを通じた生産プロセスの改善例が確認されている。今後はこれらの取り組みをさらに拡大し、デジタル技術の適用を推進していく計画である。具体的にはデータ分析技術を活用して、生産効率の最大化とコスト削減を図り国内外の市場での競争力を高める方針である。本稿ではこれらのデジタル技術による改善事例について、金型整備記録の情報とその金型で成形した品質データを記録するために必要な金型カルテに関する現場の効率化成果と今後の展望について報告する。

2. 現場効率化への課題と方策

現場効率化を進めるにあたり、金型カルテの管理システムの改善が第一に挙げられる。金型カルテとは金型の設計や保守に関わる重要情報を一元管理するシステムであり、これをペーパーレス化することで情報の即時性と正確性が向上し生産効率の大幅な改善が期待される。しかし当初は思うように成果が出せずにいた。理由として金型カルテは両面A4サイズの用紙に手書き情報が表面277項目、裏面134項目と膨大な情報が記録されていた。本来はそのデータを活用し品質や生産性の向上を行うべきだが、実情は紙情報を調査するにはデータ入力にかなりの工数が掛かることから、現場作業員間のコミュニケーションツールや問題発生時にのみ使われるあまり活用されないデータとなっていた。加えて、データの一貫

※1 モビリティ事業部 モノづくり改革部

※2 モビリティ事業部 製造部

※3 DX・ITセンター DX技術開発部

性や正確性が保証されず、手書きによる誤記や不明瞭な記述が原因でトラブルが発生することも少なくなかった。これにより、データの信頼性が低下し、実際の運用においても効果的に活用できない状況が続いていた。このような課題に対し方策として、複数の技術的課題が伴ったが、デジタル情報系部隊の技術力と我々の現場知識が結集することで一つずつ克服していった。上記課題を解決する上で現場 DX 化が必要と改めて認識したため次に課題とアプローチ方法を述べる。

3. 現場DX化の課題とアプローチ

3.1 技術者不足による展開の遅延

当初の計画では、既存のシステムを水平展開することによりプロジェクトのスムーズな進行を期待していた。この計画は、一見、実行可能で効率的なアプローチであると見なされていた。しかし、このアプローチはすぐに問題に直面する。なぜなら、実際のシステムの導入者が異動しており、技術的な詳細や運用のノウハウが十分に引き継がれていなかったからである。これにより、新たなチームメンバーがシステムの全容を把握し、必要な改修を加えるには、実質的にゼロからのスタートが必要となった。

この問題は既存システムが属人化されている事実を浮き彫りにし、その運用や改修が元の担当者に依存している状況を明らかにした。属人化は知識の伝達が不完全であることから、システムの操作や改修を行うことを困難にしている。さらにこの状況は当社のデジタル人材の不足を痛感させるものであり、技術的な専門知識が不足していることがプロジェクトの遅延を招いている。

このようにデジタルトランスフォーメーションの過程では、適切な技術者が不足していることが大きな障害となり、予想以上にプロジェクトの推進が遅れる原因となっている。

3.2 現場情報のデジタル化の難しさ

現場情報のデジタル化には複数の課題が存在する。日本の製造業は国内総生産（GDP）の約20%を占めており、その重要性は非常に高い。しかし、国際競争力は新興国の低コスト生産やデジタル化による製造プロセスの簡素化の影響を受け低下している。当社の現場では部分的にデジタル化が進められているものの、経験に基づく感覚的な作業が多々あり、この属人的な作業方法は省人化の進展に伴うリスクを内包している。

情報をデータ化しシステムを活用することで、誰もが同じ作業を行える環境を実現したいと考えているが、現場の複雑な判断をシステムに置き換えることは容易ではな

い。製造現場の具体的な状況を理解し、それをデジタルの形で表現することは大きな技術的挑戦である。デジタル化を進めるには、既存の業務プロセスを根本から見直し、新たなシステム設計の必要がある。また、従業員のデジタルスキルの向上と、新システムへの適応教育も不可欠である。

日本の製造業が国際競争力を回復するためには、こうしたデジタルトランスフォーメーションが鍵を握る。経験と直感に依存する現場から、データ駆動型の意味決定へとシフトすることが求められる。この過程で、技術的な障壁だけでなく、人的資源の側面からも多くの課題が出てくることが予想される。最終的には全ての従業員がデジタルツールを活用して効率的に作業できる環境を整えることが目標である。そのためには継続的な教育とシステムの改善が不可欠であり、全社的な取り組みが求められる。

3.3 課題に対するアプローチ

3.3.1 部門を超えた課題の共有と協力体制の構築

DX 推進組織において、モノづくりの経験はあったが、プログラミングなどの経験が欠けていた。そのため、現場の課題改善においては外部のツールに大きく依存していた。この状況は、デジタル技術の知見を深める機会を奪い、また費用の増大を招いていた。この問題を解決するため、2021年度に発足した他事業部（別工場）のデジタル情報系に特化した部隊との連携を模索した。我々は現場の工程知識と具体的な課題、そして実現したい要求事項を提供し、依頼先の部隊にはそれらを基に新たなシステムの要件定義と構築を依頼した。この協力関係は、互いの知識と経験を生かし合うものであり、相互の知識獲得と新たなビジネスへの応用が期待された。ペーパーレス化には複数の技術的課題が伴ったが、デジタル情報系部隊の技術力と我々の現場知識が結集することで、これらの課題を一つずつ克服していった。

さらに、この協力体制は部門間の壁を低減し、社内での知識共有の促進を図る効果ももたらした。各部門からの積極的な情報提供と技術的なフィードバックが循環することで、組織全体としてのデジタルトランスフォーメーションのスピードが加速した。また経験豊富なモノづくり部門と先進的なデジタル技術部門との間で新たなアイデアが生まれ、これが新商品開発や業務改善に繋がる可能性も見えてきた。

こうした成果を踏まえ、我々は今後も部門を超えた連携を積極的に推進し、DX のさらなる推進を図ることが重要であると考えている。部門間の協力は単に技術や情報を共有するだけでなく、企業文化の変革にも寄与するものであり、それによって企業全体が一丸となって新

たな価値を生み出していく力が増すと信じている。このようにしてデジタル技術の活用は、企業の競争力を高め、持続可能な成長を実現する鍵となる。

3.3.2 現場課題のヒアリング

新しいシステムの導入にあたって重視されたのは、これまで現場での作業がやりにくかった点や理解しにくかった点を徹底的に精査し、状況に応じて作業方法を柔軟に変更することである。このプロセスでは、使い勝手の良いシステムの構築と、現場の活用を主眼に進めた。

そのために現場担当者と密接にコミュニケーションを取り、問題点を明確にして、現場の不満点を解消する形でシステムの仕様を検討し進めていった。

また、このヒアリングは現場担当者に限らず、データを管理する課長や係長が抱える問題にも焦点を当てた。彼らの日常業務における困難や要望を聞き出し、それらをシステム設計に反映させることで、より効率的でストレスの少ない作業環境を提供することを目指した。このようにして、システムはただのツールではなく、実際の業務がスムーズに運ぶよう要件定義された。

4. システム紹介

次に、具体的に新たに導入されたシステムの概要を紹介する。このシステムは、ユーザーの直接的なフィードバックを基に設計されており、実際の操作性やインターフェースには特に注意が払われている。また教育とトレーニングのプログラムも整備され、導入後のスムーズな移行を支援する体制が構築されている。このシステムは日々の業務において直面する多くの問題を解消し、作業効率を大幅に向上させることが期待されている。その機能の一部を以下に紹介する。

4.1 入力簡素化（選択式、自動データ取得、計算）

4.1.1 選択式

電子化に伴い、入力工数の削減および作業者の入力のしやすさを追求した便利機能について述べる。本システ

品名	生産数	稼働率	稼働時間	準備時間	準備率	準備時間	準備率	準備時間	準備率
PS-27S	100%	稼働	0	0	0	0	0	0	0
PS-28S	48.8%	停止	0	0	0	0	0	0	0
PS-29S	100%	稼働	0	0	0	0	0	0	0
PS-30S	100%	稼働	0	0	0	0	0	0	0
PS-31S	100%	稼働	0	0	0	0	0	0	0
PS-32S	100%	稼働	0	0	0	0	0	0	0

図1. 選択項目（プルダウン）

ムでは品種によって変わる項目をマスタ化した。これにより、作業者はマスタによって作成された項目リストから適切な項目を探し簡単に選択することができる。設備を例にすると、品種ごとに生産できる設備のリストが表示される（図1）。

また、どの設備を使用したかの記録が明確になり、従来では紙データを Microsoft Excel PivotTables[®]*1（以降、PivotTable と略す）に転記する際に生じていた表記のゆれとそれに伴うデータの集計のばらつきがなくなった。

上記機能の導入により作業者のデータ入力の手間が削減されるだけでなく、選択された項目に対応するデータの自動取得や計算機能も組み込まれているため、入力ミスの低減や効率化も期待される。これによりデータ精度向上の他に、工程全体の生産性向上とコスト削減にも繋がっている。

4.1.2 自動データ取得

金型の整備工程では、作業を開始する前の準備段階として、過去のプレスの生産記録や整備状況を確認してから作業している。従来ではこれらの過去データを紙から参照し確認していたため、多くの手間と時間がかかっていた。本機能は最近の5回分の過去データを自動的に取得し、簡単に参照できる機能を織り込んだ。これにより整備担当者は迅速かつ正確に過去のプレスの生産記録や整備状況を把握することができる。表形式で一覧表示することで、データを確認する効率が向上するだけでなく、金型の状態をより詳細に把握することが可能となる。また記録された整備方法をデータとして持っておき、ナレッジ化することで業務の質が向上し、カンコツ作業からの脱却も期待され、結果として生産性の向上に繋がる（図2）。

4.1.3 計算

プレス生産開始時には、目標となるショット数（ストローク数）を設定する必要がある。これには前回の端数を考慮に入れ計算している。従来、この計算は全て人手によって行われていた。人が計算を行うことの課題として、時間がかかる上に計算ミスが発生しやすいという問題があり生産性の低下を招いていた。

品名	使用設備
PS-27S	PS-27S
PS-28S	PS-28S
PS-29S	PS-29S
PS-30S	PS-30S
PS-33S	PS-33S
PS-34S	PS-34S

図2. 過去データ参照 自動データ取得

このような背景を踏まえ、本機能ではこれらの計算を自動で行う機能を織り込んだ。この自動計算機能によって、計算にかかる時間が削減されるだけでなく、ヒューマンエラーによる計算ミスも減少する。計算作業の自動化によってプレス作業者の心理的な負担を減少させ、より本質的な業務に集中できる環境づくりも期待される。これにより、作業の効率が向上することで、工程全体の生産性が向上しコスト削減にも繋がっている（図3）。

4.2 外部機器接続による測定データの自動取得

品質検査において、一部の測定項目はデジタルの計測器具によって行われている。従来では表示された測定値を作業者が紙に転記をしていた。当機能ではこれら計測器具で取得した測定値（デジタルデータ）をタブレットへ自動転送することで、データ入力の工数を削減が期待される。

また転送されたデータを用いて製品の寸法が規格内に収まっているかどうかを自動で判定する機能も織り込んだ。寸法自動判定機能によりヒューマンエラーによる誤判定が減少し、寸法不良品の市場への流出をより防ぐことが可能になる。これは品質保証の観点からも極めて重要であり、信頼性の高い製品を提供することに繋がっている（図4）。

4.3 排他制御、改ざん防止

4.3.1 排他制御

本システムは複数の作業者が同時に利用する状況を想定して開発を行っている。具体的にはタブレットを用いて複

数のユーザーが同時にアクセスすることが可能である。

このような環境では同一のカルテを複数人が同時に編集することが起こり得る。カルテの編集においては、通常、紙や帳票の形式で情報が記録されるが、デジタル化されたシステムではデータの不整合が生じる可能性がある。例えば、複数のユーザーが同時に同じデータを編集した場合、最後に編集したユーザーのデータで上書きされるという「後勝ち」の状況が発生しうる。

この問題を防ぐために、本システムでは排他制御の機能を織り込んだ。排他制御とは、あるユーザーがデータを編集している間は他のユーザーがそのデータに対して書き込みを行えないように制限することである。この制御により、データの矛盾や不整合を防ぎ、情報の正確性と一貫性を保つことが可能となる。

4.3.2 改ざん防止

改ざん防止について、多くの企業がデータ改ざん防止を重要視している。社内方針に基づき、本システムでもデータ改ざん防止機能を織り込んだ。

具体的にはユーザーのログイン機能を利用することで、なりすましを防止し入力者を特定することで、不正なデータ入力を抑制する。また変更履歴の記録も行っており、誰がいつ何のデータを変更したのかを明確に追跡することができ、万が一のデータ改ざんを速やかに検知し修正することができる。さらにログイン権限によって、特定のユーザー（例えば係長以上）にのみデータのロックや編集を許可する機能を織り込んだ。

また入力忘れを防ぐために、データが未入力の場合には登録ができない仕様とし、ヒューマンエラーによる登録忘れのリスクを低減させている。4.2節で述べた測定値を自動で転送する計測項目に関しては、手入力ができない仕様となっているため、人的介入による入力不正を最小限に抑えることができる。

このように本システムは改ざん防止のためのいくつかの機能を織り込むことで、データの正確性と信頼性を向上させている。

4.4 データ分析機能（未完走アラート、PivotTable）での分析

本システムでは、ただデータを保存するだけでなく、データの利活用を想定したデータの収集を行っている。本稿では、「データ利活用の機能として「未完走アラート」とPivotTableを用いた分析」の2点を紹介する。

①未完走アラート

「未完走アラート」機能は、生産プロセス中に金型や製品に異常が生じ、予定していたショット数を完走できな



図3. 自動計算



図4. 品質記録自動判定

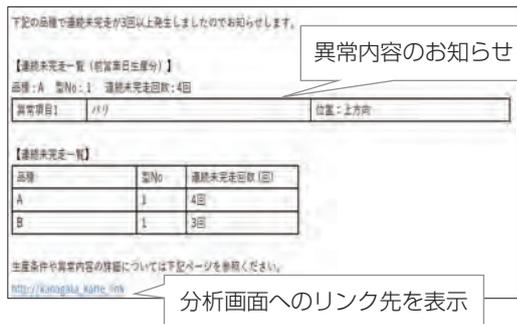


図5. 未完成アラート分析 メール送信

い場合に活用される。未完走が発生すると、金型の予定使用回数およびショット数の低下と、異常による製品の廃却が必要となる。そのため歩留まり率の低下といった生産性の悪化に繋がる。当機能では「未完走」状態が3回連続で発生すると、関係者宛てに異常内容と分析画面へのリンクが記載されたメールを自動で送信する(図5)。

② PivotTables

PivotTableは、大量のデータをもとにさまざまな集計を行ったり、分析したりできるExcelの機能のことである。会社の経理を例にして説明すると、収集された元のデータを「ユーザーごとの売上金額」「支社ごとの売上金額」などの複数の項目別に集計したり、それらの集計項目を入れ替えたりするなど、できることは多岐にわたる。

PivotTableを使用したデータ分析は、記録された4Mのデータを活用することで現場改善に生かすための集計表に生まれ変わらせることが可能となる。また、Excelに内蔵されているため、別途専用のソフトウェアを必要としないため導入のハードルが低い。PivotTableを利用することで、異常項目や寸法といったデータをパレート図やヒストグラムなどのグラフへの可視化が迅速にでき、高度なデータの活用ができる。活用例として、品種ごとや月ごとの成績を折れ線グラフで可視化することで、時系列での成績の変化を一目で捉えることができる。また、異常項目の発生数や発生タイミング、位置を集計することで、問題の特定と原因分析がスムーズに行える。さらに、4Mの条件ごとの製品寸法の可視化も可能である(図6)。

5. 改善効果

5.1 入力時間削減/ペーパーレス

これまでは紙帳票への手書き記入であったが、タブレットを使用したデジタル入力への移行により、多くの改善が見られた。具体的には、測定データの自動転送、連番入力省略や選択入力、自動計算などの入力補助機能を活用することで、手作業による入力作業が大幅に簡素

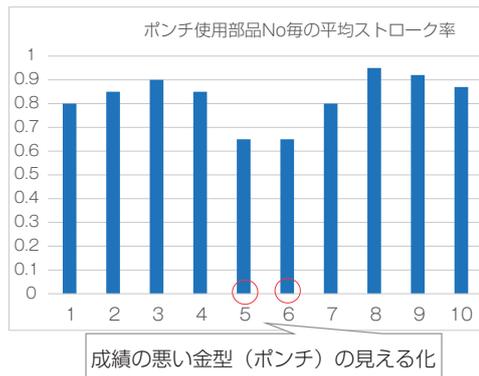


図6. 分析の一例

化された。この変更により、入力にかかる時間は月に150分短縮され、紙の使用量も月に50枚削減されている。

また、間接的な業務改善にも繋がっている。従来は必要な帳票類を探す時間やコピー作業に多くの時間が割かれていたが、これらの作業が不要になり、設備稼働に当てられる時間が増え生産効率が向上した。さらに、帳票管理の自動化によって、誤入力や情報の紛失リスクが減少し、全体の作業プロセスの信頼性向上に繋がっている。

これにより工程全体の稼働率を向上させるとともに、環境への負荷を減らすという複数の効率化をもたらしている。入力処理の迅速化だけでなく、環境保護にも繋がるため、他品種展開とさらなる簡素化を進めていく予定である。

5.2 未完走アラートによる処置の迅速化/意識改革

これまでは過去のプレス生産記録や整備状況確認を紙から参照していた。この過程は、時間がかかる上に、関係者間での情報共有が遅れがちであった。この問題を解決するために、4.4項で記述した未完走アラートシステムを導入した。

この機能では、規定のショット数に3回連続で達しない場合に自動的にメールでアラートを発報する機能が備わっている。これにより、関係者間の情報共有が即時に行われ、全員が共通の認識のもとで迅速かつ適切な処置を行うことが可能となった。結果として、異常処置が迅速に対応されるようになっただけでなく作業者の意識も向上した。この意識改革は、規定ショット数の未達率を低減させる効果をもたらし、治工具のコスト削減やプレスの稼働率の向上に繋がっている。

5.3 分析工数の削減

これまでExcelに転記してからの確認になっていたデータ分析が、機能として導入されたことにより現場での業務の質が向上した。この機能により、完走率、ストローク率、不良率をリアルタイムでグラフとして可視化でき

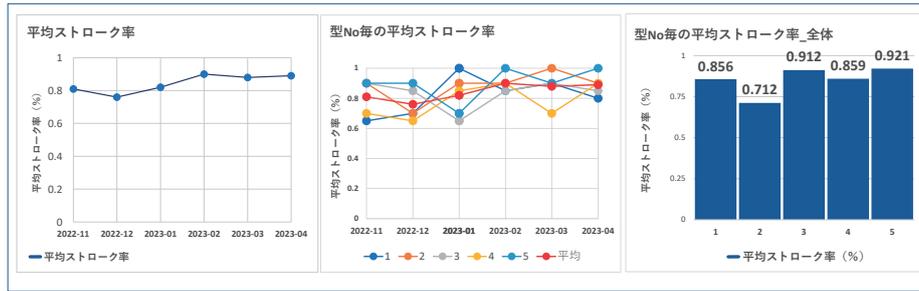


図 7. 4M 分析機能

るようになった。その結果、日常の管理工数が削減され、報告、連絡、相談のプロセスが迅速化されている。また、これにより数値悪化があった際の対応が迅速に行えるようになり、完走率とストローク率の向上に繋がっている。

さらに、4M 分析機能を実装したことで、人、機械、材料、方法の変化点を一目で把握できるようになった。この機能は、異常時の処置精度を向上させるだけでなく、カンコッ作業の削減や属人化の脱却にも繋がっている (図 7)。

5.4 不正防止、データ信頼性向上

これまでは紙帳票への手書き記入であったため、誤字脱字や乱筆箇所が多く見られた。そこで品質記録を正確に管理するために、計測機器からのデータを自動転送する機能を導入した。この機能はデータの入力過程での不正記入を防ぐことができる。さらに、異常値や空白の判定機能も備えており、ヒューマンエラーによる記入漏れや忘れのリスクを低減している。

帳票類の管理においても月次点検を簡素化し、可視化を図ることで、確認作業の工数を削減している。これにより、データの整合性を維持しながら効率的なデータ管理が行えるようになった。

加えてアカウント制御を行うことで、データの不正な改ざんを抑制しデータの信頼性を向上させている。その信頼性の高いデータに基づいた確かな処置が可能となり、工程全体として業務の質向上に繋がっている。

6. 今後の展開

上記で論じた通り、今回取り組んだテーマについて一定の効果とデジタルリテラシーを持った人材を増やすことができた。この成功を基に、今後は金型カルテのペーパーレス化対象品種を増やすために異なる品種への水平展開と分析機能を充実させ、自社工場のデジタル化を一層促進する計画である。また、これらの取り組みを効果的に進めるためには、より技術力とデジタルリテラシーを兼ね備えた人材の育成が不可欠である。そのため、社

員のスキルアップ研修や外部専門家の招致など、多角的なアプローチを取り入れる予定である。これにより、さらなる効率化と生産性の向上を目指す。

7. おわりに

今まで現場では紙に手書きで記載し情報を溜めて、そのデータを手作業で纏めてアウトプットを出すという流れであったが、本取組みにてデータを活用し業務のプロセスも変えて効果を出すことができた。今は小さな成功だが、この小さな成功を増やし会社全体を巻き込むようなモノづくり改革を進め DX を加速させていきたい。

参考文献

- 1) 経済産業省, DX レポート2 中間取りまとめ (概要), 2020-12

用語解説

* 1 Microsoft Excel PivotTables

Microsoft Excel のピボットテーブル (PivotTable)。

「Microsoft」「Excel」はマイクロソフトコーポレーションの登録商標。

P R O F I L E

オープンソースCAEとスパコン「富岳^{*1}」を活用した最適設計システム構築

Computer aided design optimization using open-source software and supercomputer “Fugaku”

安達 雅人^{*1}
Masato ADACHI

川嶋 俊一^{*1}
Toshikazu KAWASHIMA

製品開発プロセスにおいて、CAE による評価技術は重要な役割を担っている。さらなる設計品質の向上や開発期間短縮に向け、近年充実してきた公的スーパーコンピュータやクラウドコンピューティングといった大規模計算環境を活用したい。そこで本報では、ライセンスの制約が無いオープンソースソルバを選定して機能を検証した。また、オープンソースソルバとスパコン「富岳」を用いて最適設計システムを構築し、動作検証を実施した。

Computer-aided Engineering (CAE) becomes important in product development processes. To improve design quality and reduce development period, we aim to utilize large-scale computing environments such as public supercomputers and cloud services. In this report, we tested an open-source solver that has no license restrictions and verified its functions. We also built a system to optimize design geometry embedded an open-source solver and using the supercomputer “Fugaku” and verified to work it correctly.

1. はじめに

製品開発プロセスにおいて、CAE による評価技術は開発期間短縮やコスト削減、品質向上の観点で無くてはならないものとなっている。本誌ではこれまでチェーンの動的応力解析技術¹⁾や、最適手法との組み合わせに關しての紹介²⁾をしており、CAE の活用は広まっている。

近年では、公的スーパーコンピュータ（以下、スパコン）だけでなくクラウドコンピューティング（以下、クラウド）も充実してきており、大規模な計算環境を手軽に利用できるようになった。これらの環境を扱えれば、大規模な計算や最適化計算を高速に処理でき、設計品質の向上や開発期間の短縮につなげられる。また、将来的には最適化計算時に得た膨大な解析データを学習データとして用いて機械学習によるサロゲートモデル^{*2}を構築し、より高速に最適解を探索できるようにしたい（図1）。

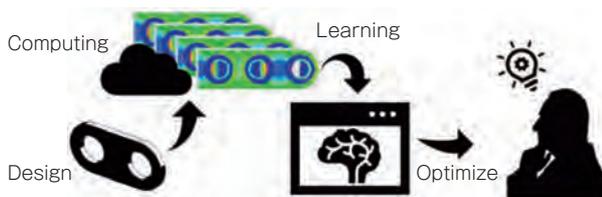


図1. CAE 評価におけるありたい姿

一方で、スパコンやクラウドといった大規模な計算環境を活用しようとした場合、解析ソルバは、使用するコア数やジョブ数に応じてライセンス数が必要となるため、費用が膨大となってしまう。

そこで、本報では、スパコン・クラウドを活用した大規模計算や最適化計算の高速化に向けて、ライセンスの問題を解決するべくオープンソースソルバを選定し、機能を検証した。次に、スパコン「富岳」を用いた最適設計システムを構築し、単純な解析モデルで試用して課題を把握した。

2. オープンソースソルバの機能検証

オープンソースソルバとは、ソースコードが公開されているソルバであり、ライセンスの範囲で無料で利用できる。商用ソルバと比較して並列コア数やジョブ数の制約が無いといったメリットがある。本報では当社内で事例の多い構造解析に着目し、大規模並列計算への適用可能性や開発体制、コミュニティ規模の観点からFrontISTR^{*3}を選定した。

FrontISTR は、Windows^{*4}やLinux^{*5}クラスタをはじめ、スパコン「富岳」などの超並列スパコンにも対応しているため、大規模な解析モデルの高速化や、並列処理にも適用できる。一方で、FrontISTR が必要な解析精度、計算時間など当社が求める性能を有するかどうかを判断

※1 DX・IT センター DX 技術開発部

する必要がある。そこで、はりのたわみによる基本的な検証や、チェーン静的応力解析、チェーン動的応力解析に適用し、商用ソルバと結果を比較した。

2.1 片持ちはりのたわみによる数値検証

図2に示す、片持ちはりのたわみは微小変形領域では線形近似が成立する一方、たわみが大きくなると先端位置が固定側に移動するため幾何学的な非線形挙動を示す。そこで、FrontISTRが幾何学的非線形問題を扱えるかを確認するため、表1に示す条件で線形解や非線形理論解とFrontISTRの解析結果を比較し検証した。

2.1.1 線形解の計算方法

はりのたわみの線形解 δ_L は式(1)から計算できる。

$$\delta_L = \frac{PL^3}{3EI} \quad \dots (1)$$

ここで、断面二次モーメント I は式(2)から計算する。

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad \dots (2)$$

2.1.2 非線形理論解の計算方法

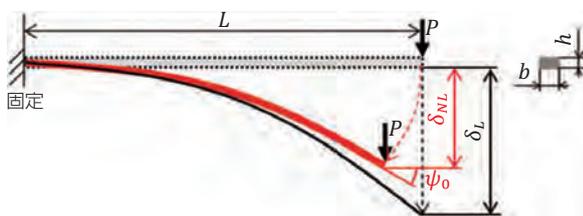
はりのたわみの非線形理論解 δ_{NL} を式(3)に示す。なお、式の導出過程については文献³⁾を参照のこと。

$$\delta_{NL} = L \sqrt{\frac{EI}{P}} \left[\int_{\phi_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{2p^2 \sin^2 \phi - 1}{\sqrt{1 - p^2 \sin^2 \phi}} d\phi \right] \quad \dots (3)$$

ここで、 p と ϕ_1 は式(4)から計算する。

$$p = \sqrt{\frac{1 + \sin \psi_0}{2}}, \quad \phi_1 = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{2p}} \right) \quad \dots (4)$$

ただし、先端たわみ角 ψ_0 は式(5)を満たす値を探索する。



線形解 δ_L : 変形前の形状・荷重位置から計算
非線形解 δ_{NL} : はり長さ L 一定で荷重位置変化を考慮

図2. 片持ちはりのたわみの概要

表1. 片持ちはりのたわみの検証条件

はりの長さ L	497 mm
はりの幅 b	4.998 mm
はりの高さ h	2.996 mm
ヤング率 E	2580 MPa
先端荷重 P	0.196 N

$$\sqrt{\frac{PL^2}{EI}} = \int_{\phi_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - p^2 \sin^2 \phi}} d\phi \quad \dots (5)$$

なお、式(3)~(5)の p および ϕ は、解を楕円積分の形にするために導入した変数であり、物理的な意味を持たない。楕円積分は、初等関数では積分した形を表現できないため、本報では数式処理ソフトウェア wxMaxima^{*6}を利用してたわみを計算した。

2.1.3 FrontISTRによる解析

FrontISTRでは図3に示すように、はりの高さ h 方向に5分割するようにメッシュサイズを決定し、正方格子状となるようにメッシュを分割した。なお、本報では部品分割によく用いられる六面体1次完全積分要素を用いた。

また、はりのたわみの非線形性を考慮するため、非線形解析機能を用いて解析を実施した。

2.1.4 非線形はりのたわみの検証結果

FrontISTRで非線形片持ちはりの解析をした結果、図4に示すとおり、はり先端のたわみが217.2 mmとなった。また、表2に各条件で求めたたわみを示す。線形解に対し、非線形理論解ではたわみが21%程小さくなったことから、表1の検証条件では非線形領域にあることがわかる。本条件下で非線形理論解とFrontISTRのたわみの差は1.2%程度と良い一致を示したことから、幾何学非線形問題にFrontISTRを適用できると判断した。

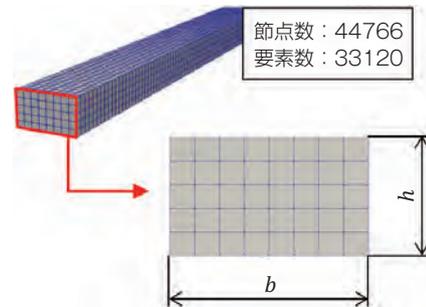


図3. FrontISTRのメッシュ分割

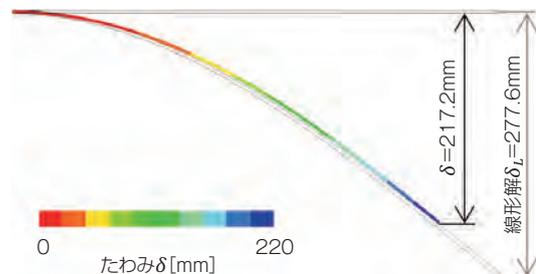


図4. FrontISTRによる非線形片持ちはりの解析結果

表2. 各条件で得られたたわみ

線形解	非線形理論解	FrontISTR
277.6 mm	219.9 mm	217.2 mm

2.2 チェーン静的応力解析による数値検証

図5にチェーン静的応力解析の解析モデルを示す。静的応力解析では、チェーンに引張力が静的に加わるときの応力を評価している。そこで、当社で使用してきた市販のソルバ（以下、ソルバA）とFrontISTRの解析結果を比較し検証した。

2.2.1 チェーン静的応力解析の解析条件

比較検証にあたり、解析条件とメッシュ、使用コア数を統一して各ソルバで解析を実施した。なお、材料非線形性と部品同士の接触を含むモデルである。

2.2.2 チェーン静的応力解析の解析結果比較

図6に外リンクプレートに生じたミーゼス応力の分布を示す。また、表3に外リンクプレートのミーゼス応力の最大値について、FrontISTRとソルバAの差と計算時間を示す。同じ計算環境においてもソルバAと同等の結果を短時間で得られることがわかった。以上の結果からチェーン静的応力解析においてはFrontISTRを適用可能と判断した。

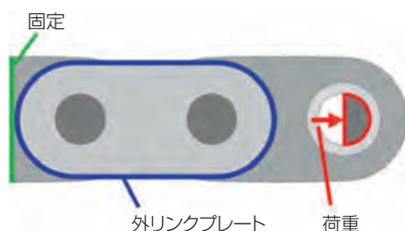


図5. チェーン静的応力解析モデルの概要

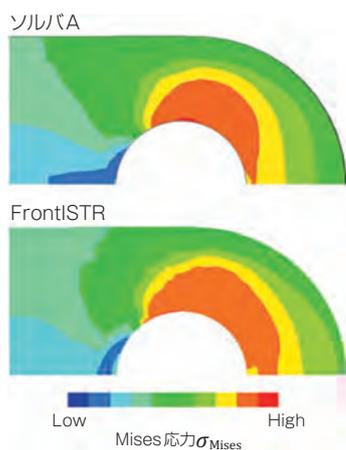


図6. 各ソルバの外リンクプレートの σ_{Mises} (上：ソルバA、下：FrontISTR)

表3. 各ソルバの比較と計算時間

	ソルバA	FrontISTR
σ_{Mises} の差	基準	+0.5%
解析時間	780 s	380 s

2.3 チェーン動的応力解析による数値検証

図7にチェーン動的応力解析の解析モデルを示す。動的応力解析では、チェーンに掛かる引張力に加え、スプロケットとの噛み合い力を考慮して応力を評価している。チェーン静的応力解析と同様にソルバAとFrontISTRによる解析結果を比較し検証した。

2.3.1 チェーン動的応力解析の解析条件

比較検証にあたり、解析条件とメッシュ、使用コア数を統一して各ソルバで解析を実施した。なお、材料非線形性と部品同士の接触を含むモデルである。ただし、ソルバAは動的陽解法であるのに対し、FrontISTRは動的陰解法である。また、FrontISTRの連立方程式の解法には計算安定化を狙い、直接法 (MUMPS^{*7}) を使用した。

2.3.2 チェーン動的応力解析の解析結果比較

図8に外リンクプレートに生じた最大主応力分布を示す。また、表4に外リンクプレートの最大主応力の最大値について、FrontISTRとソルバAの差と計算時間を示す。ソルバAでは計算安定化のために接触計算時の許容貫入量が大きく、外リンクプレートに圧入されているピンによって生じる応力が小さく評価されている。また、破断寸前の応力を見る静的応力解析に対して、動的応力解析では定常運転条件で評価している。これによりソルバAでは圧入部での応力低下の影響が表れたことでFrontISTRよりも最大主応力が小さくなった。以上よりFrontISTRでも妥当な結果が得られたと判断した。

一方、FrontISTRではスプロケットにチェーンが噛みこむ際の接触が不安定となり、ソルバAに対して計算時間が約5.8倍に増大した。図9に連立方程式の解法ごとの使用コア数による計算速度比を示す。図9での直接法 (MUMPS) の場合、並列数を32から64に増やしても計算時間が変わらない。一方、図9での反復法 (AMG 前処理付 BiCGSTAB^{*8}) の場合、並列数を128まで計算時間の短縮が可能であることを確認した。今後はより安定・高速に解を得られるよう機能開発を進める。

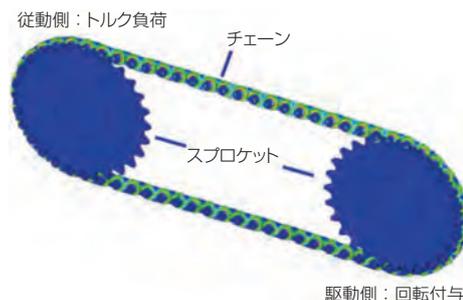


図7. チェーン動的応力解析モデルの概要

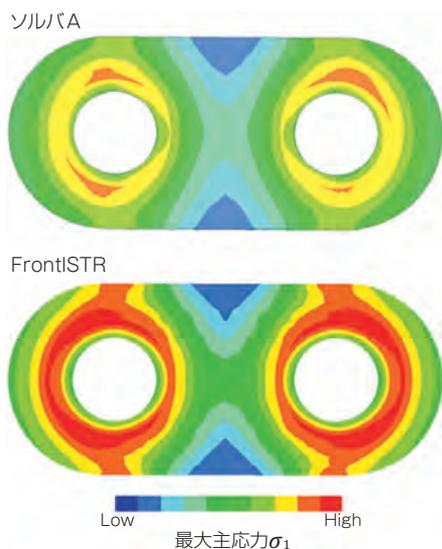


図 8. 各ソルバの外リンクプレートの最大主応力 σ_1
(上:ソルバA、下:FrontISTR)

表 4. 各ソルバの比較と計算時間

	ソルバA	FrontISTR
σ_1 の差	基準	+7.9%
解析時間	13 h	76 h

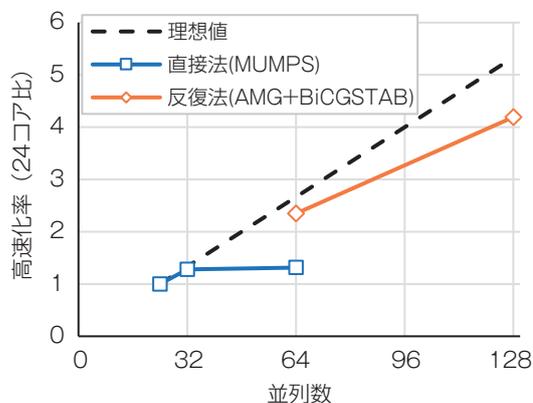


図 9. 並列数ごとの計算時間

3. 最適設計システムの検討

現状ではチェーン動的応力解析の計算時間がソルバAよりも長く、1条件での検討であればソルバAのほうが優位である。しかし、最適化計算など多条件で解析する必要がある場合には、ライセンスによるコア数・ジョブ数の制約が無いFrontISTRであればクラウドやスパコン環境を使うことで同時多並列に解析を実行できるため、全体の計算時間短縮を見込める。そこで、最適設計システムにFrontISTRを組み込むことを検討した。

なお、本事例は一般財団法人高度情報科学技術研究機構の伴走型利用支援を受け実施した内容である³⁾。

3.1 最適化ソフトウェアの選定

伴走型利用支援の期間は6カ月のため、短時間でシステムを構築する必要があった。そのため、オープンソースソフトウェアや利用者の少ない最適化ソフトウェアは使用方法の習得に時間がかかることや、適切なサポートが受けられないことを懸念し候補から外した。本報では代理店とのコンタクトの取りやすさや、富岳へのジョブ投入に必要なSSH^{*9}接続機能を有するmodeFRONTIER^{*10}を選定した。

3.2 システム構成の検討

modeFRONTIERを利用した最適設計システムを構築するにあたり、modeFRONTIERからは直接操作できないプリ処理を自動化する必要があった。そこで、当社で開発していた市販CAE用の自動解析ツールを流用し、

CADデータから自動で解析モデルを出力する自動プリシステム(Automatic Preprocessor)も合わせて構築した。図10に構築した最適設計システムの構成を示す。システムの動作の流れは以下のようになる。

1. modeFRONTIERからCADデータの寸法を自動で操作
2. VBScript^{*11}から自動プリシステムを動作させ、自動でFrontISTR用の解析モデルを出力
3. 解析モデルを富岳に転送し、ジョブを自動で投入
4. 解析結果を自動で取得し、最適解の探索が終わるまで1~4を繰り返す。

3.3 最適設計システムの動作確認

構築したシステムが正常に動作するかどうかを確認するために表5に示す事例で最適化計算を実施した結果を図11に示す。目的関数としたリンクプレートの総体積が減少している傾向にあり、最大で7.2%程度小さくなった。また、図12に各寸法と最大主応力の関係を示す。図12の赤丸に示した範囲で、最大主応力を高くすることなく体積が最小化される傾向が確認できる。以上の結果から最適設計システム自体は正しく動作すると判断した。

3.4 構築した最適設計システムの課題

本システムの狙いは最適化計算高速化のために並列で多条件実行できるようにすることであった。しかし、現状では以下の理由から逐次的な処理しかできない状態となっている。

- ・自動解析ツールをVBScript経由で起動しており、並列で処理できない。

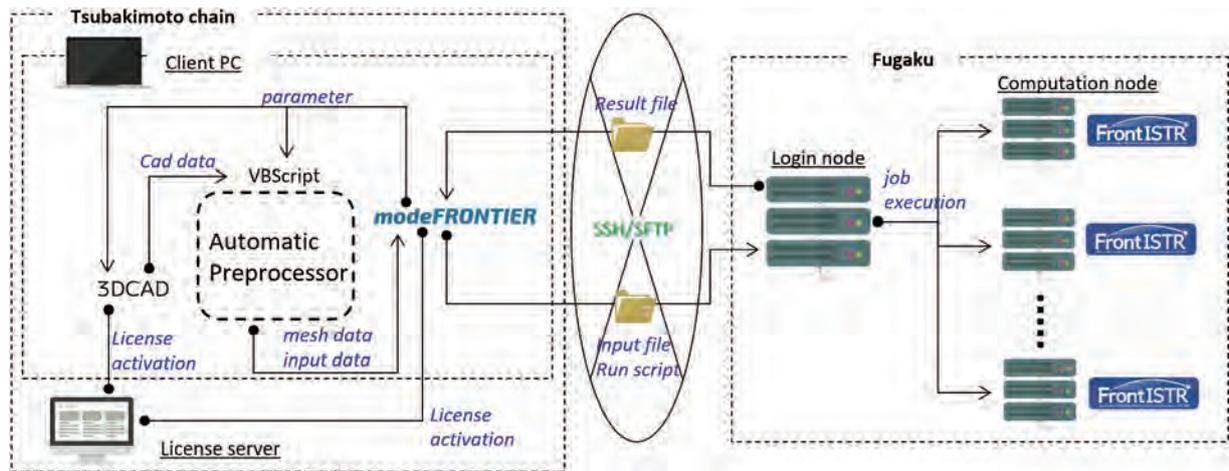


図 10. 構築した最適化システムの概要

表 5. 動作確認の最適化条件

解析内容	チェーン静的応力解析
設計変数	内リンクプレートの幅 内リンクプレートの穴径 外リンクプレートの幅 外リンクプレートの穴径
目的関数	リンクプレートの総体積
制約条件	最大主応力が初期値以下
最適化アルゴリズム	SIMPLEX
最大実行数	1000

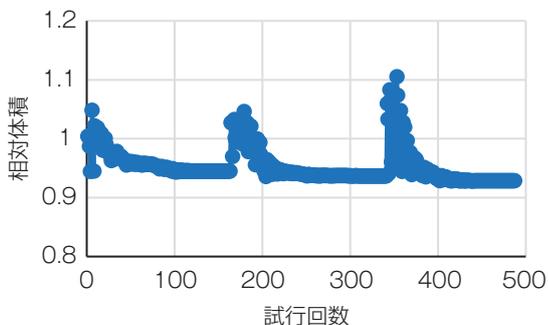


図 11. 初期値からの体積変化

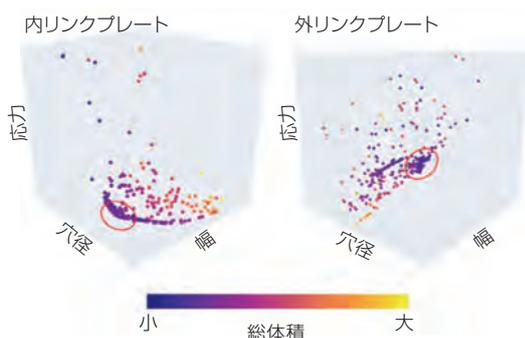


図 12. 設計変数と最大主応力の関係

・自動解析ツールから市販のプリプロセッサを操作しているため、ライセンスの都合で並列に処理できない。

また、富岳を利用した最適設計システムの動作確認の際に明らかになった課題を以下に記す。

- ・Intel^{*12} や AMD^{*13} 製の CPU を搭載した計算環境では正常に終了した解析が、富岳でビルドした FrontISTR で計算を実行した場合には異常終了するケースが見られた。特にチェーン動的応力解析では計算が収束しなかったり、収束しても計算時間が 5～10 倍程度要したりと実用的ではなかった。
- ・富岳は公的スパコンのため、他ユーザーの job 投入状況により長時間の job 待ちが発生することがあり、場合によっては最適化計算に時間を要する。

富岳を最適化計算に利用する場合には、計算のロバスト性を向上する FrontISTR のソース修正やビルド方法を検討する必要がある。また、他ユーザーの job 投入状況による job 待ちが発生してでも富岳を使用する必要がある計算（富岳でないと実施できない超大規模計算など）に限定したほうが良いと判断した。

4. おわりに

本報では、大規模計算環境の活用に向け、オープンソース構造解析ソルバ FrontISTR の検証と、富岳を用いた最適設計システムを検証した。

FrontISTR はチェーン静的応力解析やチェーン動的応力解析でも妥当な結果を得られた一方、富岳上では計算の不安定性に課題があった。また、最適設計システムにあたっては基本的な動作はできたものの、望んでいた多

条件並列計算による高速化には至らなかった。

今後、自動でプリ処理を実行するツールを最適化ソフトウェアなど外部から動作できるように改良していく。また、メッシュ生成もライセンスに依存しないオープンソースソフトウェアで実現できないか検証を進める。最適化ソフトウェアも、自動で並列実行するジョブ数にライセンスの制約が生じるため、オープンソースの最適化ソフトウェアを含めた多条件並列実行方法についても調査を進める。

さらに、チェーン動的応力解析のように計算負荷が高いモデルでも最適化計算を実行できるようにするために、富岳に限らずスパコンやクラウド計算環境の活用を視野に入れ環境構築を進める。

将来的には構造解析だけでなく、熱流体解析などについてもオープンソースソルバの検証を進め、当社の設計開発に活用できるようにしていく。また、過去の解析データや最適化計算で得られたデータを学習してサロゲートモデルをつくり、より高速に最適解を探索できるようなシステムも構築していく。構築したシステムを設計者でも扱えるようなツールとして開発し、当社で広く使えるように整備を進める。これらを通じて、より良いモノをより早く創れるように、コンピュータによる解析技術を向上し、新しいモノづくりのスタイルを構築していきたい。

参考文献

- 1) 本嶋良樹, チェーン動的応力解析技術の開発, TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.20, No.1, 2010, p.26-31
- 2) 樺井毅, チェーン開発における最適化手法の適用事例, TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.23, No.1, 2013, p.1-6
- 3) R. Frisch-Fay, FLEXIBLE BARS, Butterworths and Co., 1962, p.33-40
- 4) 佐野弘和, 富岳の活用に向けたチェーンアセンブリモデル解析の高速化, HPCI システム利用研究課題利用報告書, 課題番号: hp220332, 2022, <https://www.hpci-office.jp/output/hp220332/outcome.pdf>

用語解説

*1 富岳

理化学研究所の登録商標。Arm の命令セットを採用した独自の CPU を搭載するスパコン。2020年に稼働を開始し、当時は4つのスパコンランキングで世界第1位を獲得した。2024年現在でも利用できる。

*2 サロゲートモデル

実験や解析の結果を簡易に予測するための代理モデル。計算時間を削減できるため、精度よく予測できるモデルが構築できれば効率的に最適解を探索できるようになる。

*3 FrontISTR

東京大学奥田教授が開発したオープンソースの大規模構造解析ソ

ルバ。現在は一般社団法人 FrontISTR Commons が管理し、継続したバグ修正や機能改良がなされている。

*4 Windows

Microsoft Corporation の登録商標。コンピュータ全体の管理と制御をするオペレーティングシステム (OS) の一種。

*5 Linux

Linus Torvalds の登録商標。コンピュータ全体の管理と制御をするオペレーティングシステム (OS) の一種。オープンソースのため無料で利用できる。

*6 wxMaxima

オープンソースの数式処理ソフトウェアである Maxima にドキュメントベースの GUI が組み込まれたソフトウェア。数式をそのまま計算するため結果も数式で得られる。

*7 MUMPS

MUltifrontal Massively Parallel sparse direct Solver の略で、大規模な疎行列向けに並列実装されたオープンソースの直接法ソルバ。市販の解析ソルバにも採用されていることがある。

*8 AMG 前処理付 BiCGSTAB

非対称行列向けの反復法である BiCG 法の収束性・安定性を改善した BiCGSTAB (BiConjugate Gradient Stabilized) 法に、収束性改善のために前処理として代数マルチグリッド (Algebraic MultiGrid) 法を採用した連立方程式解法。

*9 SSH

SSH Communications Security Corp の登録商標。Secure Shell の略称で、ネットワーク上の他のコンピュータに暗号や認証を利用して接続するプロトコル。

*10 modeFRONTIER

ESTECO S.p.A. の登録商標。同社によって開発された汎用の多目的ロバスト設計最適化ソフトウェア。商用では初めて多目的最適化に対応した。

*11 VBScript

Microsoft Corporation の登録商標。Windows 上で動作するプログラム言語の一種。

*12 Intel

Intel Corporation の登録商標。

*13 AMD

Advanced Micro Devices Incorporated の登録商標。

京田辺工場を対象とした生産スケジューリング手法

Production scheduling method for the Kyotanabe Plant

濱野 智明^{*1}

Tomoaki HAMANO

瀬古 佳彰^{*1}

Yoshiaki SEKO

製造力（品質・コスト・生産性・リードタイム等）の向上はもとより、製造業における人手不足の深刻化は喫緊の課題である。一方、大量のデータを高速処理できるハードウェアの発達や、昨今のデータサイエンスの発展により、DXと一般的に称されるデータドリブンによる生産性向上の方法論は注目を集めている。当社チェーン工場では製造ラインが複雑化した変種変量生産を特徴としており、適切な生産スケジューリングにより、生産効率の向上、リードタイム短縮の実現が求められている。本稿では数理最適化手法を用いた生産スケジューリングによる課題へのアプローチ手法の紹介と成果について報告する。

In addition to improving manufacturing capabilities (quality, cost, productivity, lead time, etc.), an urgent issue is the worsening of labor shortages in the manufacturing industry. On the other hand, as a result of the development of hardware capable of processing large amounts of data at high speed and the recent advances in data science, increasing attention is being paid to methodologies for productivity improvements driven by data, which is commonly referred to as DX. In our chain factory, the manufacturing lines are characterized by complicated mixed-model and mixed-volume production. There is therefore demand for production efficiency improvement and lead time reduction through appropriate production scheduling. This paper introduces a method to approach these issues with production scheduling using mathematical optimization techniques and reports the results produced.

1. はじめに

近年、製造業における生産効率の向上は、企業の持続可能性と競争力を保つ上で重要な課題となっている。特に、当社京田辺工場のような大規模かつ多品種少量生産ラインを持つ工場では、生産計画の最適化が経営成績に直接影響を及ぼす。また、製造業界においては納期を厳守することが顧客満足度を高め、市場競争力を維持するための重要な要素となっている。

本研究プロジェクトは、京田辺工場の生産実績データを基に、納期達成率に直接影響を及ぼすボトルネック工程を抽出し、数理最適化の手法を応用してそれらの工程の生産計画を最適化することで計画遅延の最小化を目指したものであり、神戸大学との共同研究プロジェクトとして2021年度から3年間の計画で行われているものである。

本稿では、これまでの研究結果および現時点での進捗状況を報告する。

2. データ分析による現状把握

本研究プロジェクトでは、ボトルネック工程の特定を、経験と直感に頼るだけでなく、具体的なデータとして示すことも重要な意義の一つである。なぜならば、京田辺工場の特徴である変種変量生産では、製造ラインが複雑化し、製造遅延が影響を及ぼす範囲の特定に手間がかかるためである^{1),2)}。このようなアプローチは、生産プロセスの問題点を客観的に特定し、数理最適化手法を用いてこれらの問題に効果的に対処するための基盤となるものである。計画遅延に影響を及ぼすボトルネック工程の抽出にあたって、京田辺工場で生産される製品の種類は2万種におよび、さらに生産工程の多様性と機械台数の多さもあいまって、計画遅延に影響を与える品種や特定の工程を識別することが困難であるという課題が存在した。

*1 DX・ITセンター DX技術開発部

表 1. 品種群

チェーンの種類	記号
小形コンベヤチェーン	SC 群
大形コンベヤチェーン	LC 群
ローラチェーン	RC 群
ケーブルベヤ [®]	CB 群

表 2. 工程群

	部品加工	削り	熱処理	表面処理	他
初工程	F1	F2	—	—	F3
熱処理	—	—	H1	H2	H3
中間	M1	M2	—	M3	M4



図 1. チェーン生産の流れ

この課題を解決し、より有効な分析を行うため、品種を4つの主要なカテゴリーに分類（表1）し、さらに生産工程も実際の順序に基づいて複数の工程群（表2）に分けてデータ解析を実施した。

解析の結果、参考文献³⁾で触れられているように、計画遅延に影響を与える工程は熱処理工程であることが判った。熱処理工程には、炉の処理量をはじめとした特有の制約があることからボトルネックとなりがちであり、これは現場の感覚としても妥当な結果と言える。

3. スケジューリング最適化

図1はチェーン生産の流れを表しており、部品加工、熱処理、表面処理、組立・検品の流れで生産されている。また、形態としてはジョブショップの形態となっており、ジョブごとに処理工程数ならびにその順序が異なることが特徴として挙げられる。

3.1 提案手法

本研究プロジェクトの対象とする京田辺工場では、生産規模が大きく、全オーダーの全工程を対象にスケジューリングを追うことは困難であるため、熱処理工程で処理されるオーダーを対象にスケジューリングを行った⁴⁾。

本稿では、その結果を踏まえ、計画遅延が発生しやす

い熱処理工程とその前工程である部品加工工程も含めた形に問題規模を拡張し、代替機械も考慮したスケジューリングを行う。

3.2 定式化

以下に本稿で用いる記号の定義を示す。

$i = 1, 2, \dots, I$: オーダー番号

$j = 1, 2, \dots, J$: 工程番号

$c_{i,j}$: ジョブ i , 工程 j の完了時刻

$t_{i,j}$: 部品加工工程なら 1、それ以外なら 0

$a_{i,j}$: ジョブ i , 工程 j の開始可能時刻

$d_{i,j}$: ジョブ i , 工程 j の完了予定時刻

$p_{i,j}$: ジョブ i , 工程 j の作業時間

$ph_{i,j}$: ジョブ i , 工程 j の熱処理作業の処理時間

$s_{i,j}$: ジョブ i , 工程 j の開始時刻

$x_{i,j,m,n}$: ジョブ i , 工程 j がジョブ m , 工程 n に先行する
なら 1、それ以外なら 0

※上記のうち、 $t_{i,j}$, $a_{i,j}$, $d_{i,j}$, $p_{i,j}$, $ph_{i,j}$, $s_{i,j}$, $x_{i,j,m,n}$ を決定変数とする。

関係式

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \max(0, c_{i,j} - ph_{i,j} - d_{i,j}) (\forall i, \forall j) \quad \dots (1)$$

$$c_{i,j} = s_{i,j} + p_{i,j} + ph_{i,j} (\forall i, \forall j) \quad \dots (2)$$

式(1)は各工程の計画遅延の総和を表しており、総計画遅延の最小化を目的関数とする。また、式(2)は完了時刻を表しており、開始時刻と投入時刻、および処理時間の和としている。

制約条件

部品加工工程の1日の作業時間 (Hr) :

$$(s_{i,j} + p_{i,j}) * t_{i,j} \leq 20 \quad \dots (3)$$

$$\text{工程間の先行関係} : s_{i,j+1} \geq s_{i,j} + p_{i,j} (\forall i, \forall j) \quad \dots (4)$$

$$\text{機械能力制約} : s_{i,j} * x_{i,j,m,n} \leq s_{m,n} (\forall i, \forall m, \forall j, \forall n) \quad \dots (5)$$

$$\text{開始時刻の制約} : s_{i,j} \geq a_{i,j} (\forall i, \forall j) \quad \dots (6)$$

$$\text{完了時刻の制約} : c_{i,j} \geq d_{i,j} (\forall i, \forall j) \quad \dots (7)$$

制約式(3)は部品加工工程の作業時間に関する制約を表している。熱処理工程が24時間稼働であるのに対し、部品加工工程は日勤である（ただし、設備自体は夜間も稼働している場合がある）ため、1日の作業時間を

20時間とする制約を設ける。制約式(4)は工程間の先行制約を表しており、前の工程が終了していなければ次の工程が始まらないことを表している。また、制約式(5)は機械能力制約を表しており、一つの機械では同時に作業が行えないことを表している。制約式(6)は開始時刻の制約を表しており、ジョブの開始時刻は開始可能時刻よりも後に始めなければならないことを表している。制約式(7)は完了時刻の制約を表しており、ジョブの完了時刻は開始可能時刻よりも後でなければならないことを表している。

4. 計算機実験

4.1 対象問題

本稿では、最適化対象のオーダーを以下の形で抽出した。

- ① 特定の熱処理炉を通過するオーダー
 - ② ①のオーダーが通過する前工程とその機械
 - ③ ②で抽出した機械で処理されるオーダー
- ※①、③で抽出したオーダー全てを対象とする。

また、計画時の機械(予定機番)と、実際に処理した機械(実施機番)が異なる場合、これを代替機械とみなし、予定機番を前提としたスケジューリングと、代替機械を考慮したスケジューリングの双方で実験を行った。

4.2 実験条件

・パラメータ(予定機番)

実験期間: 1ヵ月

オーダー数: 374

作業時間: 0.0058(分) ~ 3355.2(分)

工程数: 1 ~ 3

機械台数: 13

・パラメータ(実施機番)

実験期間: 1ヵ月

オーダー数: 374

作業時間: 0.0058(分) ~ 3355.2(分)

工程数: 1 ~ 3

機械台数: 15

・実験環境(共通)

ソルバ: IBM^{*1} CPLEX Optimizer ver.22.1.10

OS: Windows11 Pro

CPU: Intel(R) CoreTM*2 i9-12900 CPU @ 2.40GHz

メモリ: 128GB

計算時間: 12時間(打ち切り)

表3. 実験結果

	予定機番	実施機番	実績データ
総計画遅延 日数(日)	0.5355(日) 12.9(時間)	0.2046(日) 4.9(時間)	820.31(日)

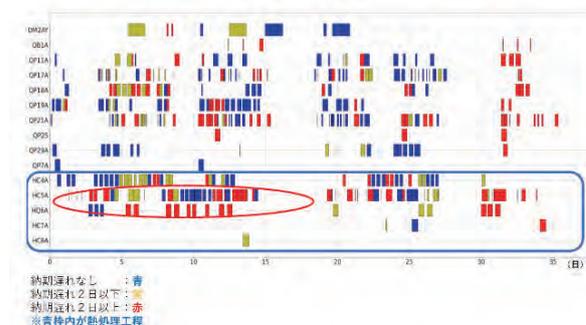


図2. 実績ガントチャート

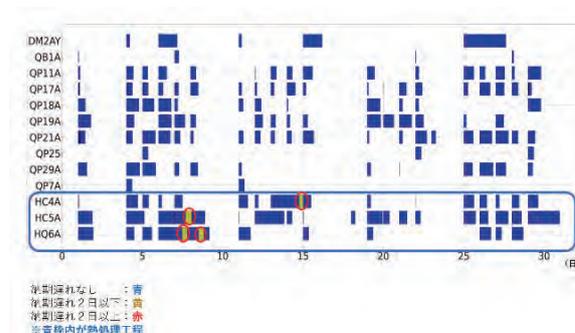


図3. 最適化結果(予定機番)ガントチャート

4.3 実験結果・考察

以下に実験結果を示す。表3は計算機実験の最適化結果と実績データの結果である。

最適化の結果、実験結果は実績データに比べて計画遅延日数を大幅に減少させることができた。次に示す図2、3、4は実績データおよび最適化結果のガントチャートであり、縦軸は作業を行う機械、横軸は日数となっており、計画遅延なしで処理されているオーダーが青、計画遅延日数が0~2日のオーダーが黄、2日以上 of オーダーが赤となっている。

図2に示す実績データ上の総計画遅延日数は820.31日となっており、ガントチャート上も多くのオーダーが赤(2日以上 of 遅れ)で表示されていることが分かる。

図3に示す最適化結果は、代替機番への再割り当てを行わず、計画時に割り当てられた機番に処理を割り当てた結果となっている。実績と比べ、前工程・熱処理工程共に計画遅延が大幅に減少していることが分かる。

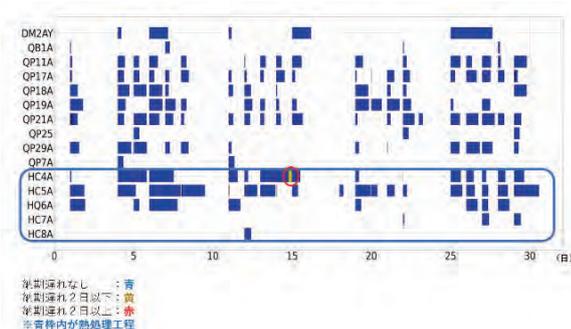


図 4. 最適化結果（実施機番）ガントチャート

図 4 に示す最適化結果は、代替機番への再割り当てを行った結果となっている。図 3 と同様、実績と比べて前工程・熱処理工程共に計画遅延が大幅に減少していることが分かる。また、予定機番から実施機番への割り当て変更は15件あり、そのうち熱処理工程での変更が14件であったことから、前工程では機番を変更することなく生産が行えている。

5. 結論

本稿では、参考文献^{3),4)}の結果を踏まえ、計画遅延に影響を与える熱処理工程と、その前工程となる部品加工工程を、代替機械も考慮した上で最適化を行った。

実験結果からは、前工程も含めて計画遅延を大幅に減少させることが分かった。また、代替機械への再割り当てでは93.3%が熱処理工程で行われており、前工程では予定機番を変更することなく処理が行われることも分かった。

今回の実験では、生産する品種の切り替えに伴う段取り時間等の付帯時間を考慮していないため、今後はこれらも考慮した上で、前工程に加えて熱処理と連動した表面処理工程も含める形に問題規模を拡張しスケジューリングを行う。また、問題規模を拡張することで、厳密解法では解を求められなくなることが考えられるため、計算時間を抑えるためのメタ解法等の実装にも取り組んでいく。

6. 謝辞

本研究プロジェクトにおいて、多大なるご協力を賜りました皆さまに深く感謝申し上げます。まず、神戸大学 DX・情報統括本部 藤井教授におかれましては、専門的な知識と豊富な経験を基にしたご支援をいただきました。また、社内の関係者の皆さまにおかれましては、

日々の業務との両立を図りながら積極的に参加していただき、感謝申し上げます。今後ともご支援とご協力を賜りますよう、何卒お願い申し上げます。

参考文献

- 1) 松村瞭, 北村真紀, 製造遅延発生時の納期への影響推定方法, 情報処理学会83回全国大会, p.305-306, 2021
- 2) 大平栄二, 藤田浩嗣, 少量多品種のためのデータベースの検討, 津山工業高等専門学校紀要, 48巻, p.61-65, 2007
- 3) 舟橋慧人, 藤井信忠, 渡邊りこ, 渡邊俊介, 國領大介, 貝原俊也, チェーン工場を対象とした多品種生産スケジューリング手法, 精密機械工学会, 2023
- 4) 舟橋慧人, 藤井信忠, 渡邊俊介, 國領大介, 貝原俊也, 渡邊りこ, 濱野智明, 瀬古佳彰, 大規模チェーン工場を対象とした生産スケジューリング手法に関する一提案, 日本機械学会, 2024

用語解説

*1 IBM

International Business Machines Corporation の登録商標。

*2 Intel

インテル・コーポレーションの登録商標。

以上

新構造セレクトブルクラッチの開発

Development of a selectable clutch with a new structure

畷中 祐仁^{※1}

Yoshihito SHIMANAKA

自動車技術分野では自動運転や電動化の開発が推進されており、複数の動力源を電動で切替えることができる機械要素が必要とされている。そこで、制御が容易、かつ電動アクチュエータでも動作可能で、伝達トルクが従来比1.5倍となることを目標にセレクトブルクラッチを開発した。カムとラチェットを用いる新構造を提案し、評価した結果、伝達トルクが従来比2.9倍となるセレクトブルクラッチを開発することができた。

In the field of automotive technology, the advances in the development of autonomous driving and electrification have created a need for mechanical elements that can switch electrically between multiple power sources. In response to this, firstly we developed a selectable clutch with the aim of creating a product that is easy to control, can be operated by a simple actuator, and has 1.5 times the allowable torque of conventional clutches. We evaluated a newly designed cam and ratchet structure and, as a result, we finally developed a selectable clutch with 2.9 times the allowable torque of conventional clutches.

1. はじめに

自動車技術の発達は我々の生活を豊かにした一方、自動車事故やCO₂の排出などの課題も残されており、これらの課題を解決する方策として、自動運転¹⁾や電動化²⁾技術の開発が推進されている。

レベル5を除く自動運転では、人による操作と機械による操作を必要に応じて切り替える必要がある。また電動車においても、内燃機関と電動機の動力、もしくは複数の電動機の動力を最適に切替える必要がある。

動力を切替えるクラッチ機構には、湿式多板クラッチやドグクラッチなどがある。湿式多板クラッチは係合（動力伝達）させるために大きな力が必要となるため一般的に油圧が利用されるが、電動化により油圧源の確保が徐々に困難になっている問題がある。またドグクラッチは入力軸と出力軸の回転速度が異なると係合できないため、制御が高度化する問題がある。そこで当社では、電動アクチュエータでも動作が可能で、係合タイミングの制御が容易であるセレクトブルクラッチを開発している。

ロックモード、ワンウェイモード、両方向フリーモードを切り替えることができる。各モードでの動力伝達状態を表1に示す（以下、両方向ロックモードを2wayモード、ワンウェイモードを1wayモード、両方向フリーモードをFreeモードと表す）。

係合にはカムのくさび作用によるセルフロック現象を利用しているため、係合のために大きな力を要しない。また、Freeモードにおいて、出力軸よりも入力軸の回転速度が低い任意のタイミングで、1wayモードに切り替えることができる。1wayモードでは係合待機状態となり、入力軸の回転速度が出力軸に追い付くと自動的に係合する。回転速度が同期したことを確認した後に必要に応じ2wayモードにすればよい。このように、簡易な制御でもなめらかな係合を実現できる。さらに、1wayモードはカムクラッチと同一の機能と性能を持つ。ラチェット式のワンウェイクラッチのようなラトル音（空転時の爪打ち音）は発生せず、空転耐久性が高く、バックラッシュもない。このため1wayモードを主体として使用することもできる。

2. セレクトブルクラッチの機能説明

セレクトブルクラッチは当社のコア技術であるカムクラッチを応用したもので、任意のタイミングで両方向

表1. 各モードでの動力伝達

	正転方向	逆転方向
2wayモード	係合	係合
1wayモード	係合	空転
Freeモード	空転	空転

※1 研究開発センター メカ・マテリアル開発部（執筆時）

3. 開発目標

3.1 セレクタブルクラッチの課題

カム式のセレクタブルクラッチが2wayモードのとき、正転方向にトルクを伝達するカムと逆転方向にトルクを伝達するカムが同一内外輪上に接することとなる。内外輪を直線展開した模式図を図1に示す。トルクを入力すると一方のカムが荷重を受け持ち、弾性変形によりわずかに転がることで、外輪は図右側にわずかに移動する。このとき他方のカムはかみ合い待機状態にある。トルクを除荷すると、転がったカムは元の姿勢に戻るため、外輪が図左側にわずかに移動する。このとき他方のカムのかみ合いが始まり、荷重を受け持つこととなる。このため完全にトルクを除荷しても、両方向のカムに荷重が残る。この現象を「かみ込み現象」と呼んでいる。2wayモードから別のモードへの切替えはアクチュエータの推力をカムに加えてカムを浮かせることにより行うが、かみ込み現象が発生すると、カムを浮かせるために必要なアクチュエータ推力が大きくなり、カムの摩耗も懸念される。基礎研究として、前述したかみ込み現象のメカニズムの仮説検証を行い、その影響も確認している。

かみ込み現象を防止するために、一方のカムと他方のカムの自転を保持器により連動させることで、一方のカムが荷重を受けているときは他方のカムを非接触とさせる構造³⁾や、正転方向と逆転方向の軌道輪を分割し、バックラッシュを設ける構造⁴⁾、一つのカムで両方向のトルクを受け持つ構造⁵⁾などを開発した。しかし構造が複雑になることに加え、各部品への精度要求が厳しくなったため、構造の簡素化が課題であった。また複雑な機構

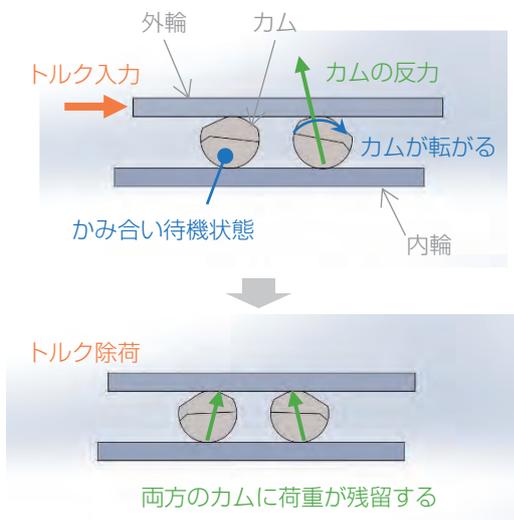


図1. かみ込み現象

の追加により伝達トルクに対して体格が大きくなったため、小型化も課題であった。特に小型化は、競争力を確保する上で重要な課題であった。

3.2 目標スペック

従来より簡易な構造で、かつ体格に対する伝達トルクを従来比で1.5倍にすることを目標に、開発を推進した。目標スペックを表2に示す。先行開発段階であることを鑑み、重要課題である伝達トルクに特徴を持たせる一方、必要以上に設計制約を課さないことを心掛けた。

表2. 目標スペック

機能	2wayモード、1wayモード、Freeモードの3モードを有すること
伝達トルク	従来比 1.5倍
引きずりトルク	1wayモード：カムクラッチ同等 Freeモード：メカロス同等
モード切替え推力	100 N以下
バックラッシュ	極力小さいこと

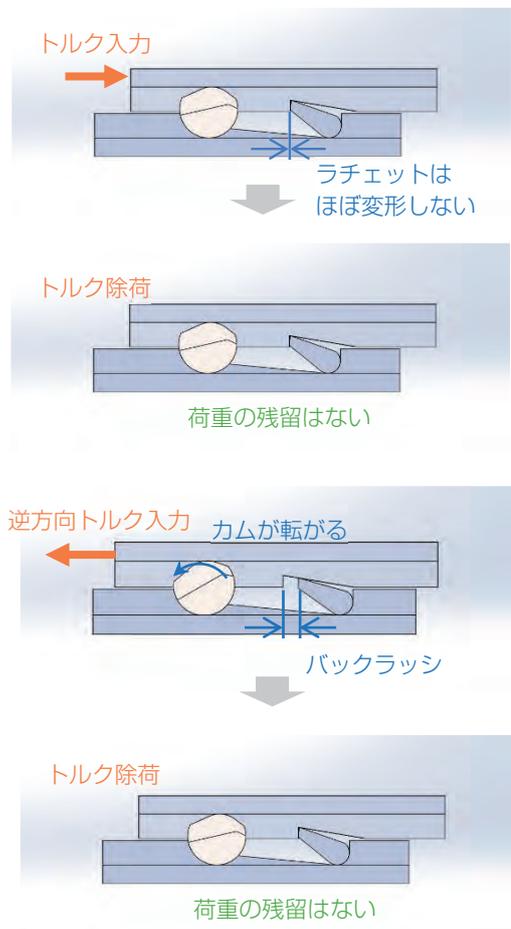


図2. かみ込み防止コンセプト

4. 設計

4.1 コンセプト

かみ込み現象が発生する本質的な要因は、①トルクを伝達する際にカムが弾性変形して転がること、②カムが常にかみ合い待機状態にあること、である。そこで、一方のカムをラチェットに置き換えるアイデアを考えた。コンセプト創出時の簡易モデルを図2に示す。本構造では、①ラチェットは剛性が高いため、ラチェットが荷重を受け持っても弾性変形はほとんどない。このため、トルクを除荷しても外輪の変位がないので、かみ合い待機状態にある逆方向のカムが荷重を受け持つことはない。②カムが荷重を受け持ち弾性変形により転がると、ラチェットにバックラッシュができるため、かみ合い待機状態にない。トルクを除荷されるとバックラッシュがなくなるが、カムやラチェットに荷重が残留することはない。このような原理で、カム式セレクトブルクラッチの利点を損なわずにかみ込み現象を防ぐことができると考えた。簡易モデルを機構解析することにより、かみ込み現象が発生しないことを確認した。

4.2 基本設計

前述のコンセプトをもとに、目標スペックを満足できるように基本設計を行った。3D CADモデルによる外観を図3に、各モードの断面図を図4に示す。

ラチェットは簡易モデルのように歯が円周方向に可動するボール型ではなく、内輪ごと軸方向に移動するらせん型にすることで、省スペース化を図った。

4.3 設計計算

基本機能である伝達トルクと切替え推力についての設計計算の結果を報告する。

4.3.1 伝達トルク

自動車用途のクラッチは軸方向の小型化を要求されることが多いため、外径と伝達トルクは従来構造とほぼ同等とし、軸方向の寸法が可能な限り小さくなるよう設計した。カムクラッチ部は既存の設計計算式で算出し、最大伝達トルクは2,500 N・m、定格トルクは1,400 N・mとなった。ラチェットは原理的に基本指標と考えられる歯面の圧縮応力を求めた。材質の降伏応力と比較して十分低面圧であると判断した。

従来構造と新構造の定格トルクを図5に示す。カムクラッチとラチェットのいずれも、伝達トルクは径方向の大きさの二乗に比例し、軸方向の大きさに比例する。図の直線は、トルク容量を比較するために、カムとラチェッ

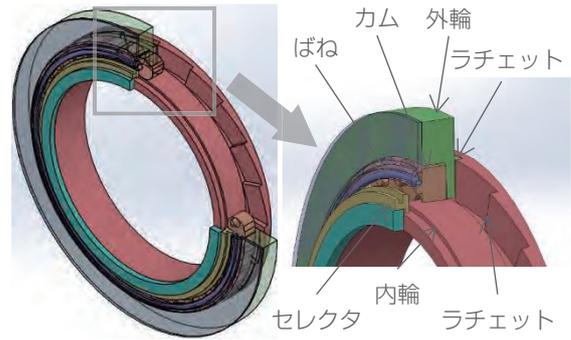


図3. 外観

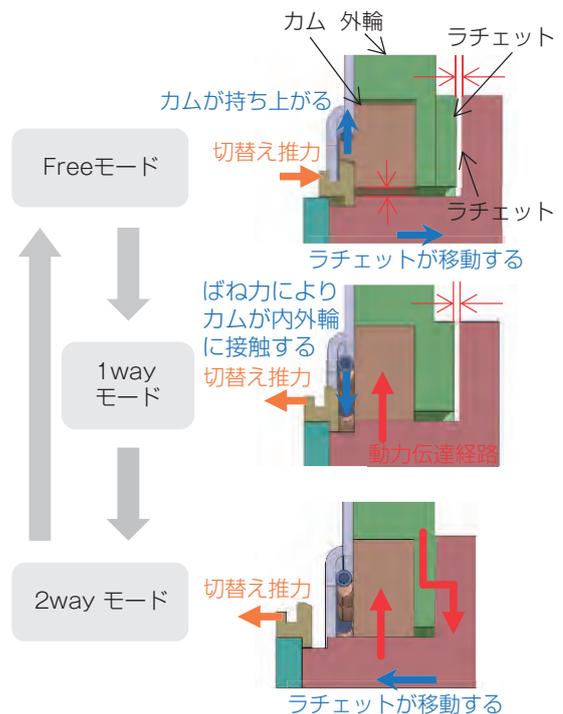


図4. モード切替え遷移図

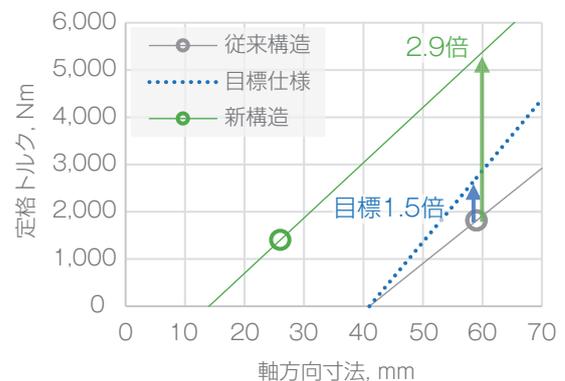


図5. 伝達トルクの比較

トの軸方向の大きさを変化させたときの定格トルクである。設計計算上、目標仕様である従来構造比1.5倍を大きく超える、2.9倍の伝達トルクを持つことがわかった。

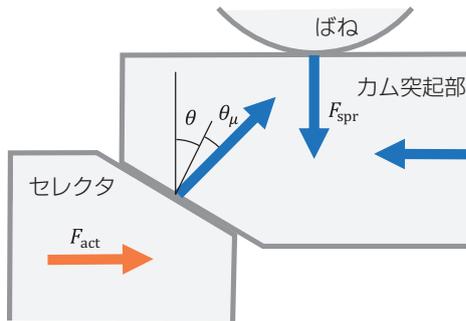


図 6. カム突起部の力のつり合い

4.3.2 切替え推力

1way モードから Free モードへの切替えは、カムの突起を内輪方向に押さえるばね力に対抗して、セレクトタを軸方向に押し込みカムを持ち上げることにより行う。このときの力のベクトルを図 6 に示す。カム突起部の力の釣り合いから下式を設計計算式として立案した。

$$F_{act} = F_{spr} \tan(\theta + \theta_{\mu})$$

$$\theta_{\mu} = \tan^{-1} \mu$$

F_{act} : 切替え推力、 F_{spr} : ばね力、 θ : カム突起のテーパ角、 θ_{μ} : 接触面の摩擦角、 μ : 接触面の摩擦係数。

4.4 簡易評価

3D プリンタで簡易試作を行い、動作を確認した。簡易試作品の外観を図 7 に示す。

Free モード、1way モード、2way モード全て動作することが確認できたものの、いくつかの不具合が発生し



図 7. 3D プリンタによる簡易試作

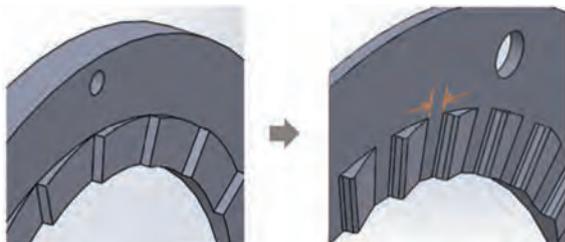


図 8. ラチェットの逃げ

た。重要なものとして、2way モードでカムが負荷を受ける方向にトルクが入力がされると、カムの弾性変形に起因するねじれ角で、ラチェットの裏側同士が干渉することが分かった。本問題は設計変更が必要と判断し、ラチェット裏面に図 8 に示す逃げを設けた。

5. 評価

設計計算結果および簡易試作評価により、現段階で基本設計は適切であると判断し、詳細設計を行った。量産相当の寸法精度で試作品を製作し、評価を行った。評価の一部を報告する。

5.1 機能評価

まず定性評価として、モードの切替えと各モードでの軸へのトルク入力を手動にて行い、機能を確認した。モードの切替えはスムーズであり、各モードとも係合と非係合が不安定になることなく機能した。2way モードにて手動でトルクを負荷し、Free モードに切替えたが、切替え推力が重くなることはなく、かみ込み現象は観測されなかった。その他、懸念に思われる挙動は無かった。

5.2 伝達トルク評価

次に、伝達トルクを評価した。クラッチの状況を観察しながらさまざまなトルクの負荷と除荷を繰り返した。定格トルク、最大伝達トルクのいずれのトルクでも、またカムクラッチ側の負荷でもラチェット側の負荷であっても、トルクを伝達することができた。試験後にモードの切替えなどの機能に異常は見られなかった。分解後のカムおよびラチェットの外観を図 9 に示す。破損や大きな変形は見られなかったことから、設計計算は妥当であったと判断できる。

なお、カムとラチェットの材質は、試作品では納期とコストを圧縮するためプリハードン鋼を用いたが、量産では焼入れ鋼を用いることを想定している。カムとラチェットの破損モードから、伝達トルクと降伏応力は比例するとして、本試作品の目標トルクを設定した。



図 9. 最大トルク負荷後のカムとラチェット

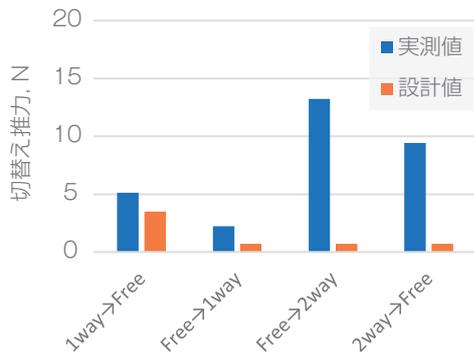


図10. 切替え推力

5.3 切替え推力評価

まずトルクを負荷しない状態での、各モード間の切替え推力を計測した。計測結果を図10に示す（以下、モード切替えの表記は、切替え方向を矢印でつないで表す。例えば1wayモードからFreeモードへの切替えは1way→Freeと表す）。

1way→Freeは、前述の3.3.2項に示した設計計算の値を図中に設計値として示した。その他のモードの切替えは、ばね力に起因するしゅう動摩擦に対抗する切替え推力が必要であるため、ばね力と摩擦係数より求まる切替え推力を設計値として示した。

Free→1wayは、理論値よりも実験値が高い値となった。これはばね力によるしゅう動抵抗だけでなく、セレクトと内輪などはめあい部で考慮できていない摩擦抵抗が発生したためであると考えられる。

1way→Freeも、理論値より実験値が高い値となった。実験値からFree→1wayで実測されたしゅう動抵抗を差し引くと理論値とほぼ等しくなるから、前述の3.3.2項の切替え推力の設計計算は妥当であったと考えられる。

Free→2wayと2way→Freeの推力についても、設計値よりも実測値が高く、1way→Freeで観測された実測値よりもさらに大きな値であった。大きな推力が必要なのは各部が動き出すまでであり、動き始めると小さな力で可動した。このことから、静止摩擦係数が想定より大きい、キーやラチェットなど接触面積の広い面が潤滑油により粘着することで、設計値より高い値となったものと考えられる。

いずれのモード切替えにおいても目標値である100 Nを大きく下回った。またしゅう動抵抗が設計値と乖離したものの、不具合が懸念されるような現象は見られなかったため、今後は実測値を設計値として盛り込むことを検討する。

5.4 かみ込み時の切替え推力評価

かみ込み現象の有無を検証するため、ラチェットが負

荷を受ける方向にトルクを負荷し、除荷した後に切替え推力を測定した。負荷したトルクを横軸に、切替えに要した推力を縦軸に整理した結果を図11に示す。矢印のついている点は、計測の都合上、正確な切替え推力が測定できなかったため、計測できた最大の値を示したものである。試験は複数回行ったが、初めてとなる大きさのトルクを負荷したときの切替え推力と、同一以上のトルクを負荷した後の2回目以降の切替え推力に大きな差があったため、初回と2回目以降を分けて図にプロットした。

初めてとなる大きさのトルクを負荷したときは、負荷したトルクに比例して切替え推力が大きくなった。かみ込み現象によるカムの残留荷重も負荷したトルクに比例することから、かみ込み現象が発生したと推定される。一方、2回目以降の負荷では、無負荷時の切替え推力より若干大きいものの、切替え推力は負荷したトルクに比例していないため、かみ込み現象はほぼ抑制できたと推定できる。初回の負荷でかみ込みが発生した原因は、ラチェットの歯面の位置度や輪郭度の誤差により、歯が片当たりしていたことであると考えられる。ラチェットのねじり剛性はカムクラッチと比較すると極めて大きいためかみ込み現象は発生しないと想定していたが、歯の片当たりにより、ラチェットの剛性が下がったことで、かみ込み現象が発生したと考えられる。またその接触面は初回のトルク負荷で微小に塑性変形し、相手面に沿う形となったことで、2回目以降の負荷では剛性が上がり、明確なかみ込み現象は発生しなくなったと考えられる。

初回のトルク負荷時のみかみ込み現象が発生する問題の対策として、ラチェットにプリロードを加えることで解決できると考える。ただし2回目以降の負荷でも、切替え推力のバラつきが大きく、目標値である100 Nを上回ることがあった。

ラチェット側への負荷によるかみ込み評価と同様に、カムが負荷を受ける方向にトルクを負荷し、除荷した後

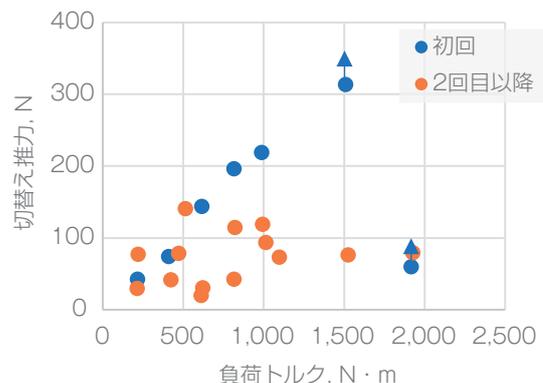


図11. ラチェット側のかみ込み評価

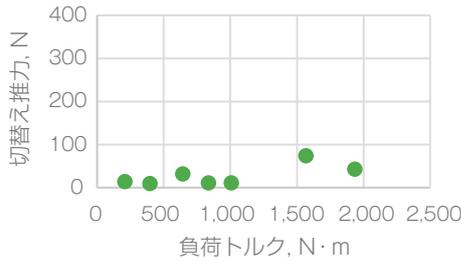


図12. カム側のかみ込み評価

に切替え推力を測定した。結果を図 12に示す。切替え推力は目標値の100 Nを下回る値であり、負荷トルクとの相関も見られなかったことから、かみ込み現象は発生していないと推定できる。

5.5 評価結果のまとめ

報告を割愛した引きずりトルクとバックラッシは特に課題はなかった。評価結果を表3にまとめる。概ね全ての目標値をクリアした。ただし2way → free の切替え推力のバラつきが大きく、目標値の100 Nを上回ることがあった。必要推力のばらつきを考慮すると、アクチュエータに要求する推力は200 N程度とすることが安全であると考えられる。この値は目標値の100 Nは上回るが、電動アクチュエータが現実的に出せる推力の範囲内にある。

6. 今後の展望

切替え推力を低減させることで、電動アクチュエータを小型化することができる。ラチェットの弾性変形量をFEM 構造解析したところ、最大伝達トルクで0.01mm程度の弾性変形量であることがわかった。そこで、この弾性変形量を吸収できるよう、図13に示すようにラチェッ

表3. 評価結果一覧

		目標値	評価結果	判定
定性評価		手動で作動	○	○
トルク 負荷	正転定格	1000N・m破損無	1000N・m破損無	○
	逆転定格	1000N・m破損無	1000N・m破損無	○
	正転破壊	1900N・m破損無	1900N・m破損無	○
	逆転破壊	1900N・m破損無	1900N・m破損無	○
引き ずり トルク	1way	カムクラッチ同等	55 mN・m	○
	Free	メカロス同等	21 mN・m	○
切替 推力	free → 1way	100 N 以下	2.2 N	○
	1way → 2way	100 N 以下	13.2 N	○
	2way → free	100 N 以下	平均72.5 N	△
バックラッシ		なるべく小	0.3 deg	○

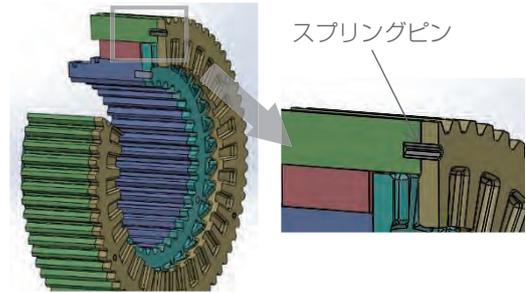


図13. 設計変更案

トと外輪をスプリングピンで締結し、スプラインのすきまばめで弾性変形を吸収する構造を提案した。量産に向け加工工程の検討と制約も加味し、開発を継続している。

7. おわりに

電動化と自動運転技術の開発が進む自動車を主なターゲットとして、電動アクチュエータで動作可能であり、従来比でトルク容量が2.9倍となるセレクトブルクラッチを開発した。自動車技術の発展に伴い生じた社会課題の解決は、その豊かさを享受する現代の技術者に課せられた責務と考える。豊かさを築いてきたこれまでの技術者に敬意と感謝の意を持ちながら、次世代を豊かで幸せにする技術開発に邁進したい。

参考文献

- 1) 首相官邸, 官民 ITS 構想・ロードマップ2020, https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20200715/2020_roadmap.pdf (参照2024-05-15)
- 2) 経済産業省, 「トランジション・ファイナンス」に関する自動車分野における技術ロードマップ, <https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230330005/20230330005.pdf> (参照2024-05-15)
- 3) 楠 颯太, カムクラッチ, 特開2023-34964, 2023-03-13
- 4) 畠中 祐仁, カムクラッチ, 特許第7315880号, 2023-07-27
- 5) 間瀬 亮太, カムクラッチ, 特許第7417155号, 2024-01-18

高汎用性立体チェーン“ヘリカルチェーン™”の開発

Development of the "Helical Chain" highly versatile three-dimensional chain

徳本 力^{※1}

Tsutomu TOKUMOTO

「ヘリカルチェーン」は、複雑多軸かつ広い可動域を持つ機械構造の軽量化と簡素化に貢献する、新しい三次元動力伝達機構である。そのヒンジ構造は従来形式を踏襲し、これまで蓄積された加工法や組立法、保守法との互換性を保ち、周期構造の螺旋形リンク部材により、ケーブルベヤ[®]のようにケーブル収納をも可能としている。ヘリカルチェーンは、一般用途に加え、ロボティクスや DX、IoT といった新領域とも適合する「強度と汎用性のバランス形」機械要素部品である。

The "Helical Chain" is a new three-dimensional power transmission mechanism that contributes to weight reduction and simplification on mechanical structures that have complex multiple axes and a wide range of motion. The hinge structure used follows the conventional form and maintains compatibility with the processing, assembly, and maintenance methods accumulated so far. The chain also realizes cable storage like the CABLEVEYOR due to the spiral link members in a periodic structure. In addition to use in general applications, the Helical Chain is a mechanical element component with "balanced strength and versatility" that is also compatible with new areas such as robotics, DX and IoT.

1. はじめに

ヘリカルチェーン機構¹⁾は、動力伝達経路の立体配置や、アーム型装置など可変構造への適用を想定したチェーンである。例えば、直交軸減速機を用いた場合と比較して、構造物や熱源などを大きく迂回した動力伝達経路を描くことができる(図1)。

機械設計において、レイアウト自由度向上と装置軽量化に寄与することで、SDGsをはじめとした社会課題解決への貢献や、今後需要が見込まれるロボットなど自律的移動体への適用といった、ビジネス機会の拡大も期待できる。

本機構は、Bennett 機構や Bricard 機構で知られる立体リンク機構を原形とした周期構造の直鎖であり、拘束条件を省略することで柔軟な構造を得ている。ヒンジとリンク部材は生産性の高い加工法を適用でき、最小限の部品点数で構成可能なため、複製が容易という特長がある(図2)。

直鎖構造を持つ立体リンク機構の研究は、機構学や位相幾何学の分野に数多く存在するが²⁾、いずれもチェーンのような使用法は想定されておらず、具体的な構造支持方法や動力伝達についての研究は見当たらない。本研究ではチェーンのみならず、動力伝達の要となるスプロケットについても扱っている。



図1. ヘリカルチェーン機構の外観

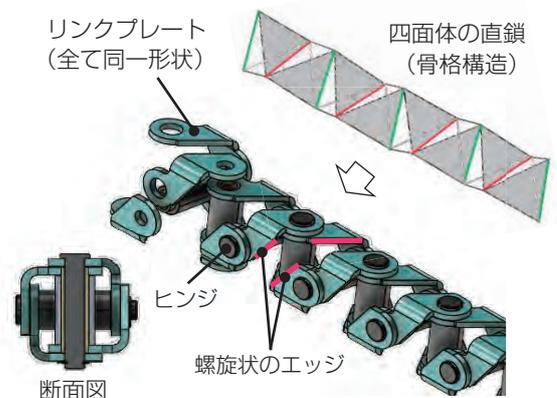
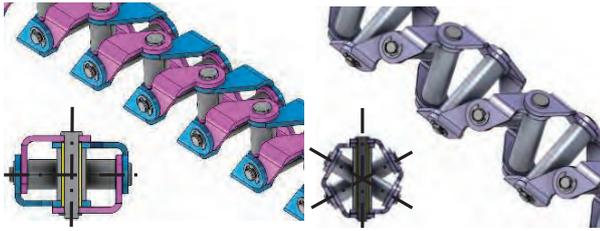
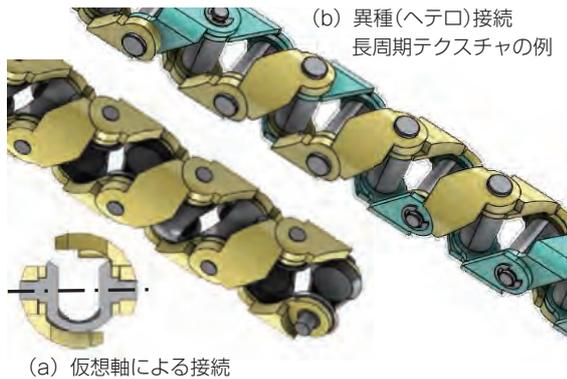


図2. 基本構想と機構原理

※1 研究開発センター エレクトリフィケーション開発部



(a) 扁平型 (b) 六角型
図3. 異形断面チェーン



(a) 仮想軸による接続 (b) 異種(ヘテロ)接続
長周期テクスチャの例
図4. その他の構成例

2. 基礎原理

2.1 チェーン

2.1.1 基本構成

ヘリカルチェーンの名称はL字形リンク部品が形成する二重螺旋の周期構造に由来し、螺旋状のエッジがスプロケットやカムと噛み合うことで動力伝達を行う。リンク部材は頑丈な鋼板などを選択でき、ヒンジはピンとブッシュにより強固に接続される。基本形状が螺旋であるので、チェーンの進行方向に対して前後の区別があり、換言するとスプロケットに裏表の区別が生じる。また、リンク部品形状により右ねじ(Z撚り)と左ねじ(S撚り)の区別がある。一方で、螺旋は周期構造であるためスプロケットの噛み合い、および、屈曲運動については4面とも同一視でき、この性質によりチェーン軌道の立体配置を可能としている。

2.1.2 その他の構成例

ヘリカルチェーンは特許上の定義³⁾で、異形断面を包括している(図3)。また、構成要素部品の製法について板金加工やヘッダ加工を選択可能としつつ、限定はしていない。樹脂成型や鋳造、鍛造、AM(Additive manufacturing)などを適用することで厚肉リンクプレートや、仮想軸の構成が可能となる。ヘリカルチェーンはその編成についても包括している。これは、テレメトリ部品組込や、チェーンピッチよりも長周期なテクスチャ形成による刃具形成、といった応用を意図したものである(図4)。

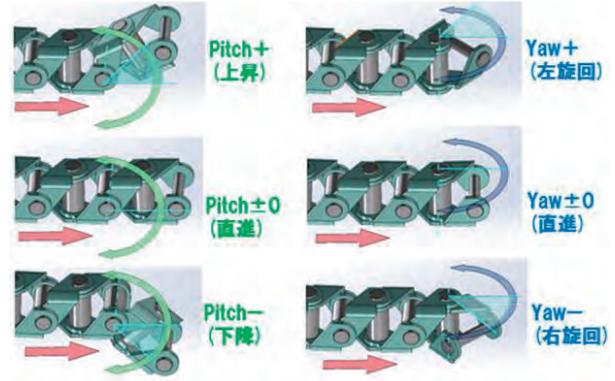
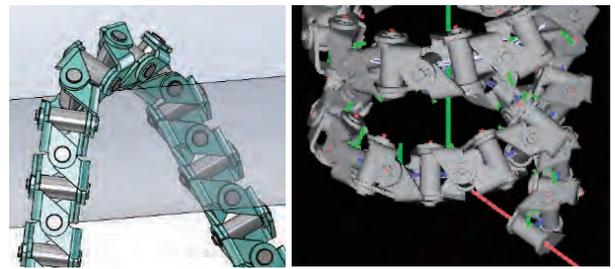


図5. 機構の自由度



(a) 折り返し (b) ドラム巻き付け

図6. リード角を伴う旋回運動の例

(リード角ゼロであれば運動学的扱いは一般チェーンと同じ)

2.1.3 運動学的性質

ヘリカルチェーンは、アタッチメントによる機能拡張のため、進行方向に対し上下左右の2方向にのみ屈曲する2自由度のチェーンであり、軌道や姿勢の事前計算が可能な構造である。従って、コンベヤチェーンと動力伝達チェーンの両運用方法に対応する(図5)。

2自由度チェーンは軌道を軸周りに旋回する際、旋回軸とチェーン軌道の投影像が垂直に交わることが望ましい。つまり、チェーン軌道はスプロケットのなす円盤と同一平面に置き、リード角をゼロとする。スプロケット径が出力間で異なる(変速を伴う)アプリケーションでは、アイドル設置によりスプロケット投入時の軌道修正を要する。

チェーン軌道が旋回軸に対し斜めに入射すると、チェーンは進行方向に対してねじれ、結果的に鏡像の姿勢となる。図6(a)はSolidWorks^{*1)}による簡易作図、図6(b)は独自ソフトウェアによるドラム巻き胴への巻き付けシミュレーション結果である。多くの市販3DCADは図6の軌道計算に対応しないため、曲線へのフィッティングを議論する際、運動学に基づく非線形最適化問題^{*2)}を解く必要がある。

巻き胴シミュレーションでは、リンク姿勢を縦横にラスタスキャンさせ、巻き胴の直径による螺旋軌道に対して誤差の少ない姿勢を探索し、ステップサイズと探索範囲を絞り込むことで簡易的にフィット姿勢を求めている。

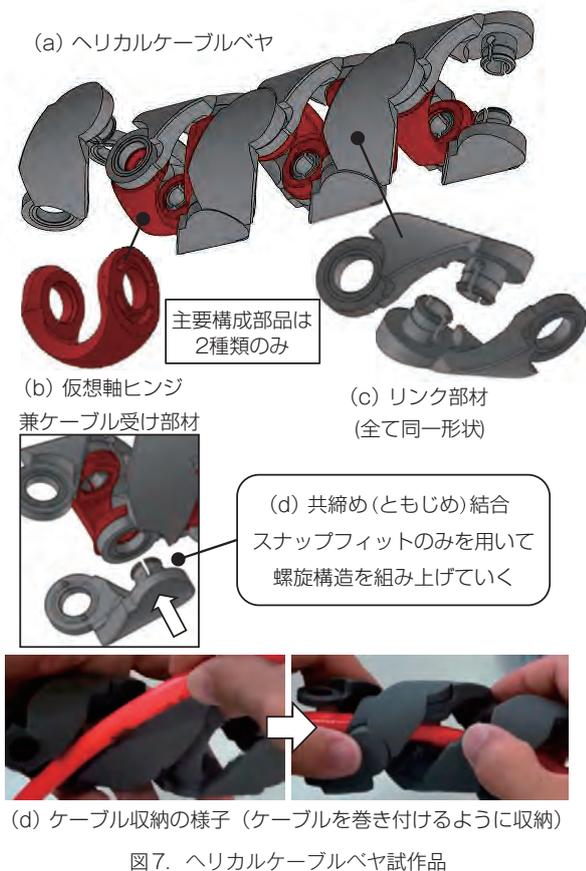


図7. ヘリカルケーブルベヤ試作品

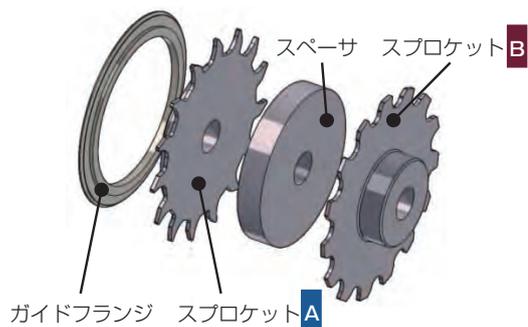


図8. スプロケットの構造

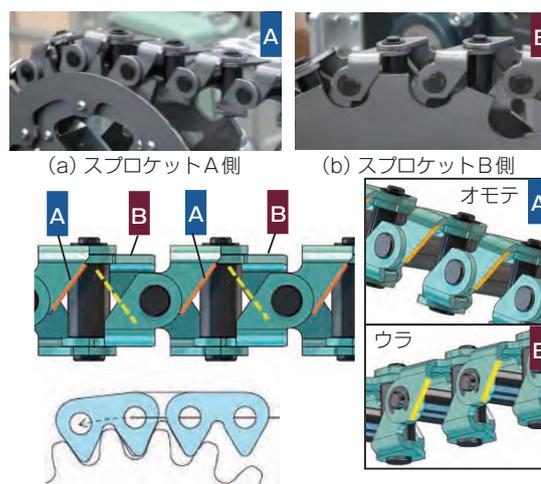


図9. スプロケットの噛み合い原理

2.1.4 ヘリカルケーブルベヤ™

ヘリカルチェーンは、L字形のリンク部材が内部空洞を形成し、かつ、リンク間は開口した状態にあるので、ヘリカルチェーンにケーブルを巻き付けるだけでケーブル収納が可能となる(図7)。従来のチェーンと異なり、動力伝達だけでなく、リンクプレートが外骨格として組込部品を保護する機能も兼ね備える。この特性は、例えば、プラントメンテナンス用途で狭隘難環境へプローブを送り込む、といった用途が考えられる。

2.1.5 ヘリカルチェーンの引張強度

ヘリカルチェーンのヒンジ機構は従来の動力伝達チェーンに倣っているため、曲線搬送プラチェーン*³や、ロボット向け立体ケーブルベヤ*⁴よりも強固な構造である。

一方で、リンク部材がL字形となるので、金属疲労や曲げモーメントの観点から動力伝達専用ローラチェーン*⁵に対し、原理的に強度が劣ることは自明なため、ヘリカルチェーンは「汎用性と強度のバランス形」という位置付けで開発している。破壊の要因は曲げモーメントが支配的であり、強度向上策としてはリンク部材を厚く、チェーンの断面積を小さく絞ることが効果的となる。内部空洞の容積とチェーン強度は二律背反の関係となる。

2.2 スプロケット

2.2.1 基本構成

ヘリカルチェーン用スプロケット⁴⁾は、2列タイプスプロケットに脱線防止用のガイドリングを装着した形態とし、既設の生産設備を利活用可能とした(図8)。

2.2.2 チェーンとスプロケット噛み合い原理

ヘリカルチェーンの奥行き方向の透視像を描くと、山形の構造が浮かび上がる。ここで、ガイドリングにより、チェーンの奥行き方向の屈曲を拘束すると、その投影像はサイレントチェーンと同一視できる(図9 abc)。従ってスプロケットの歯は、サイレントチェーン用スプロケットの歯を奥行き方向に分割し、干渉部を除去した形となる。この形態は、チェーン内部空洞を有効活用できる特長がある。

2.2.3 アクセス対称性

ヘリカルチェーンは周期構造を持つので、スプロケットは断面図示で4方向から同様にアクセスできる。軌道を立体的に配置する際、チェーンをタイミングベルトのように振じる必要がないため、直交するスプロケット同士の距離が近い場合や、距離が動的に変化する場合に有効である。一方で、スプロケットは裏表の区別が生じるため、刻印によるチェーン取付方向明示とポカヨケ*⁶設置が望ましい。

3. 実機の具現化

3.1 実機試験

3.1.1 ヘリカルチェーンの試作

ヘリカルチェーン機構の成立性確認のため、ブッシュを持たない簡易構造の試作機を作成した。リンクプレートはSPCC鋼板 t3.2mm をレーザー切断、プレスブレーキ曲げ、穴部をリーマ仕上げし、市販のスペーサを挟みφ8ヒンジピンで結合した(図10)。試作品概略寸法を図11に、その諸元を表1に示す。各ヒンジの可動域は、60°とした。

3.1.2 スプロケットの試作

スプロケット試作品はSPCC鋼板をレーザー切断して作成した(表2)。ヘリカルチェーン内部空洞の活用を意図し、螺旋状のエッジと歯が噛み合う設計とした。



図10. ヘリカルチェーン試作品

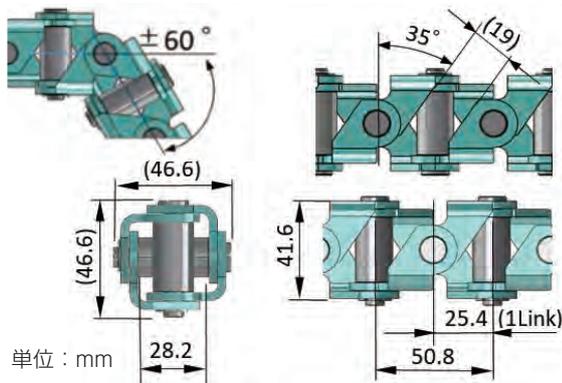


図11. 試作品の概略寸法と可動域

表1. ヘリカルチェーン試作品諸元表

項目		
リンク数	130	個
リンク当たりの重量	102	g
全長	3.3	m
総重量	13.2	kg

表2. スプロケット試作品諸元表

項目		
歯数	15	T
PCD	244.33	mm
重量	4	kg
シャフト径	25	mm

3.2 試験装置

試験装置はアームのように全体が開閉する構造を取り、架台2基をヒンジで結合、ヒンジと同軸のアイドルスプロケットによってチェーン軌道を折り返している(図12)。

各架台に設けたドライブスプロケットによりトルク伝達を行い、片方には位置調整のための台形ねじ、もう片方にはチェーンに張力を加える重錘式緊張装置が接続されている。この構造により、アーム開角度とスプロケット位置が動的に変化する状況でもトルク伝達が可能であること、つまりタスク平行性について確認する。

試験装置設計のもうひとつのコンセプトとして、既存の食い違い軸動力伝達装置、例えば直交軸歯車減速機やユニバーサルジョイントによる動力伝達では達成が困難な状況を盛り込んでいる。すなわち、ユニバーサルジョイントより広い可動域、建屋構造材や熱源などを想定した大きく迂回した軌道、タイミングベルトのように無理に振るような実装をせず、チェーンの分解組立可能という特性を生かすため、チェーンが狭小スペースを潜り抜ける配置とした。

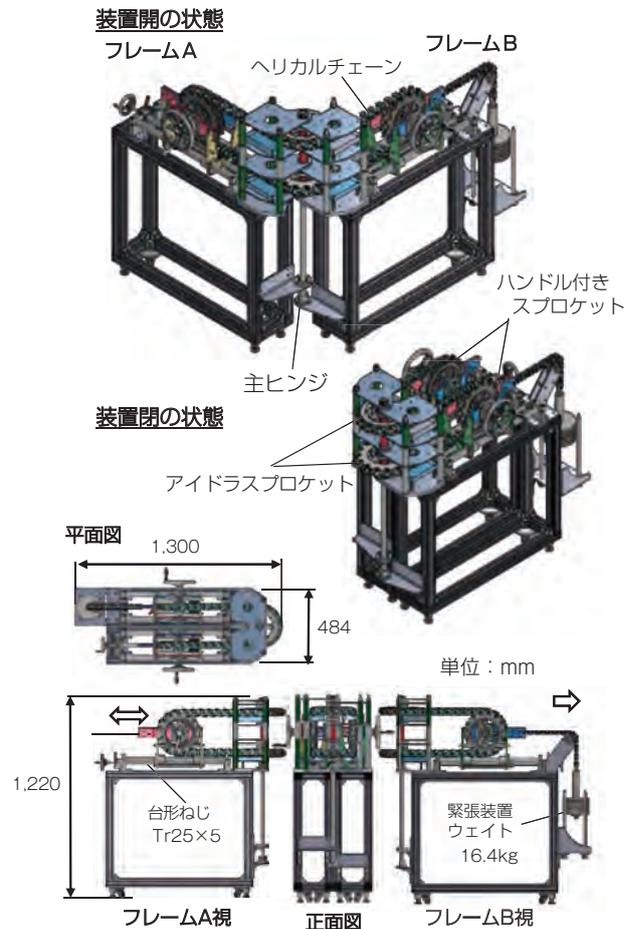


図12. 試験装置の構造

4. 実機実験

4.1 実験目的

まず試験装置組立を通じ、チェーンおよびスプロケットの機構レベルの成立性を確認し、続けて、試運転を通じアーム開閉、スプロケット配置変更とトルク伝達のタスク並行性について、機械システムレベルの成立性を確認した。

4.2 試験装置の構成

試験機のチェーン軌道のみを図13に抜き出した。この試験機では、フレーム同士の二面角、フレーム A 側スプロケットの位置、チェーンの送り速度を能動的に操作可能で、フレーム B 側のスプロケットの位置は、重錘式緊張装置によって受動的に動作する。

今回の実験では、フレーム B は地面に対して固定し、フレーム A 側の操作によって二面角を調整している。この時、重錘式緊張装置の影響により、干涉駆動のように二面角は常に開こうとする力が働くため、手でフレーム A を押え込んでいる。アイドルスプロケットはチェーンの経路に沿って上下段で逆方向に回転するため、ベアリングによる支持とし、上下段で表裏逆向きに設置する。

本実験に限らず、チェーンを水平に巻き掛けた場合、その軌道は重力の影響でカタナリ曲線を描く。これにより、スプロケットとの噛み合いが阻害されるため、サポート用の耐摩耗性樹脂パッドを配置した。

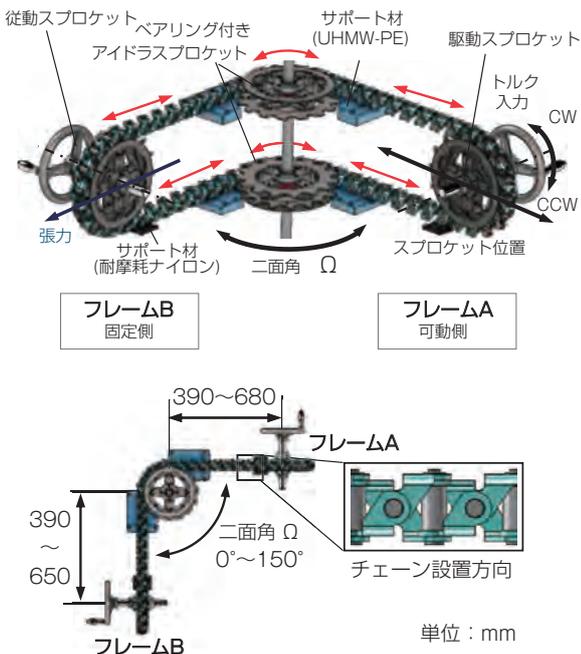


図13. 実験時の構成



図14. チェーン経路折り返し箇所

図14にアイドルスプロケットによるチェーン経路折り返し部分を示す。視認性を確保するため、主ヒンジの支持部材の一部を取り外している。

4.3 実験条件

以下の条件にて実験を行った。

- (1) 二面角を90°に固定し、駆動スプロケットの位置を475mm～680mmの範囲で位置を変えた。
- (2) 駆動スプロケットの位置を490mmに固定し、二面角を0°～90°の範囲で可変した。
- (3) 上記(1)、(2)の条件でスプロケットやフレームの配置を操作しながら、同時にスプロケットの回転方向の正逆切り替え、停止、回転再開を繰り返した。

4.4 実験結果

上記実験により、試作品チェーンおよびスプロケットについて、正逆転を行っても正常に噛み合い、機構レベルでの成立性を確認した。

また、アーム、スプロケットの配置変更とトルク伝達タスクを同時並行に実行可能であることを確認した。図15に条件(2)における実験の様子を示す。

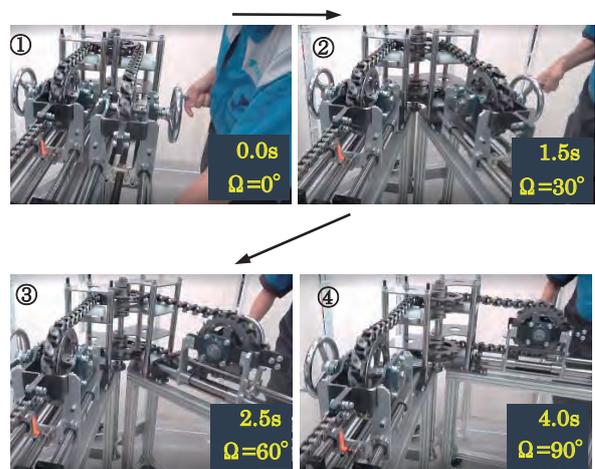


図15. 実験結果（動画よりコマ撮り）

4.5 考察

ヘリカルチェーン機構により、既存の食い違い軸動力伝達機構では困難な動作を実現した。

- (1) ヘリカルチェーンによる動力伝達では直交軸歯車減速機のようにアームの内側の領域を占有せず、建屋構造物や熱源などを迂回する軌道を取ることが可能である。
- (2) ユニバーサルジョイントよりも二面角の可動域を広く設定することが出来る。
- (3) アクセス対称性によってチェーン断面に対し4方向から等価的にアクセスできるため、立体軌道を取るとき、平ベルト、タイミングベルトのように捻じる必要がない。
- (4) 経路途中で分解組立が可能なため、入り組んだ関節部など、狭小かつ複雑なレイアウトでも高い組立性、保守性を発揮する。

5. おわりに

ヘリカルチェーン機構は、部品点数を抑え、鋼板などを適用可能とした簡易構造かつ強靱な立体チェーンであり、利便性と強度のバランス形という位置付けで開発を進めている。今回は、螺旋状のエッジをスプロケットと噛み合わせることで、内部空洞を活用可能な動力伝達方法について提案し、実験によって機構の成立性について確認した。

現段階では幾何的条件に掛かる動作確認にとどまるので、実利用を想定した負荷環境下での定量的評価がこれからの課題である。

今後は、ヘリカルチェーンの強度向上に掛かる研究、ヘリカルチェーン機構の持ち味をさらに引き出すためのチェーン構造やデザインの研究、周辺システムや設計支援ツールの研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 徳本 力, 多田 隈 建二郎, ヘリカルチェーン機構—動力伝達用立体チェーンの原理創案と実機検証—第41回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2023, セッション番号1C3-04
- 2) 鍛冶 静雄, 曲線の幾何学から生まれた閉リンク機構2018年度精密工学会春季大会 AIMaP 数学応用シンポジウム資料集, 2018, p.62-65
- 3) 徳本 力, チェーン, 特許第7478912号, 2024-4-24
- 4) 徳本 力, スプロケットおよび動力伝達装置, 特許第7511065号, 2024-6-26

用語解説

* 1 SolidWorks

SolidWorks は仏ダッソーシステム社の登録商標

* 2 非線形最適化問題

結果の望ましさが非線形の評価関数の形で表現される時、その値が最小（または最大）となる変数を決定する問題。本件ではターゲットとなる曲線と、チェーン軌道をフィッティングさせるための探索アルゴリズムを指している。多くの場合重い計算を必要とする。

* 3 曲線搬送ブラチェーン

例えば、当社のプラトトップ®チェーン TPU シリーズが挙げられる。コンベヤ用に設計された2自由度立体チェーンで、飲料工場のボトル充填ラインなどに使用される。

* 4 ロボット向け立体ケーブルベヤ

例えば、Tsubaki KabelSchlepp GmbH のROBOTRAX®シリーズが挙げられる。元々、動力を伝達する設計ではなく、ケーブル保護具である。構造を維持するためにワイヤーケーブルを芯金として使用する。

* 5 動力伝達専用のローラチェーン

例えば、当社のRS®シリーズが挙げられる。

* 6 ポカヨケ

いわゆるフル・ブルーフ設計。単なるミス防止のみならず労災防止にも繋がる。

アルミ製テンショナ 切削面の画像処理による外観検査

Visual inspection using image processing on the machined surface of aluminum tensioners

森口 翔生^{*1}
Shoki MORIGUCHI

平井 達也^{*1}
Tatsuya HIRAI

河野 浩二^{*1}
Koji KONO

永野 和明^{*2}
Kazuaki NAGANO

アルミ製テンショナの切削加工面上に発生する外観不良である、「巣」「圧痕」「キズ」「欠け」「凸形状」の外観検査について、現在は人手にて全数検査を実施しており、生産効率向上・安定化に向けて、画像処理による自動化を検討している。自動化する上で、不良基準の異なる各不良を判別する必要があり、本件では同軸落射照明とローアングル照明の組み合わせによる判別方法を報告する。

"Nests," "indentations," "scratches," "chips," and "convex shapes" are all appearance defects that can occur on a machined surface of an aluminum tensioner. Visual inspections for these defects are currently carried out by human workers on all items and the automation of these inspections by using image processing is being considered as a measure for production efficiency improvement and stabilization. In order to automate such a process, it is necessary to be able to discriminate between each defect with different defect criteria. In this report, we describe a discrimination method using a combination of coaxial epi-illumination and low-angle illumination.

1. はじめに

テンショナとは、自動車用エンジンのタイミングチェーンシステムに使用される、円滑なチェーン動作のためにチェーンに張力を加える部品である。本部品について、品質保証のため現在は人手にて外観不良を全数検査している。そのため、生産効率の向上・外観検査の安定化に向けて、画像処理による外観検査工程の自動化を検討している。

本件の対象となるアルミ製テンショナ（アルミ鋳物含む）において、切削加工を施した面（以降、切削面）に発生する不良項目として、「巣」「圧痕」「キズ」「欠け」「凸形状」（詳細は2章 各不良項目について）の5項目が存在する。前述の各不良の発生によりテンショナの性能が著しく低下する可能性が高いため、確実に検知する必要がある。また、不良項目ごとに独立した不良判定基準があるため、項目を判別しての判定が必要となる。

本件では、「巣」「圧痕」「キズ」「欠け」「凸形状」の5項目について、各不良の発生原因より想定される形状を基に光学系を選定し、それをを用いた各不良の判別方法を実現した。よって、本件の光学系による各不良の検出原理および判別方法について報告する。

2. 各不良項目について

本件で対象としている「巣」「圧痕」「キズ」「欠け」「凸形状」について、それぞれの発生原因と発生例を以降で説明する。

2.1 巣とは

巣（鋳巣）とは、鋳造時に鋳物内に発生する空洞により発生する不良のことである。発生原因により、ひけ巣（冷却時に体積が減少する「凝固収縮」により発生する巣）や空孔（鋳造時に空気やガスを巻き込むことで発生する巣）に分類されるが、どちらも鋳造による成型時に発生する。切削加工により空洞の一部が切削面上に現れ、凹んだ形状となる。図1に巣の発生例を示す。



図1. 巣の発生例

※1 研究開発センター エレクトロニクス開発部

※2 モビリティ事業部 タイミングシステム統括 モノづくり改革部

2.2 圧痕とは

圧痕とは、切削面に先鋭物等が接触し、圧迫されることにより発生する不良のことである。前述の発生原因より圧痕の発生箇所周辺では、圧迫された領域が切削面方向に押し出されることにより隆起した形状が発生することが多く、発生箇所内部では、圧迫された領域が押し戻されることにより凹凸形状が発生することが多いと考えられる。圧痕では、発生原因となる物の接触面積や荷重とその方向により、発生傾向がいくつか存在する。図2に圧痕の発生例を示す。

2.3 キズとは

キズとは、切削面に先鋭物等が接触し、圧迫されたまま移動する等により発生する不良のことである。切削加工によるツールマークとは異なり、キズの発生箇所周辺では捲れや引き摺れ等による隆起形状が発生することが多く、発生箇所内部では圧迫された領域が押し戻されることにより凹凸形状が発生することが多いと考えられる。図3にキズの発生例を示す。

2.4 欠けとは

欠けとは、切削加工の状態（エンドミル刃状態の状態不良、切削油の不足等）の不良から起こる切削不良により、切削面輪郭部が欠け落ちることにより発生する不良のことである。切削面輪郭部が欠け落ちるため、切削面



図2. 圧痕の発生例

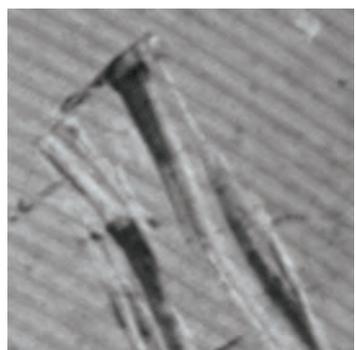


図3. キズの発生例

およびその側面に対して凹んだ形状として発生する。図4に欠けの発生例を示す。

2.5 凸形状とは

凸形状とは、切削面の側面（特に輪郭部周辺）から衝撃が加わることにより発生する不良のことである。側面から衝撃が加わるため、切削面輪郭部やその周辺の切削面が隆起した形状として発生する。図5に凸形状の発生例を示す。

3. 不良検出原理

本件では、2種類の照明を組み合わせた光学系を使用し、各照明による照射光に対する反射光である、正反射光*¹と拡散反射光*²での画像における写り方を組み合わせることで判別を行う。図6に正反射光・拡散反射光のイメージを示す。

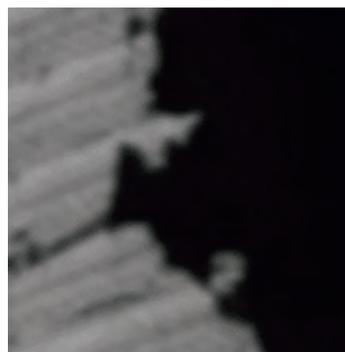


図4. 欠けの発生例

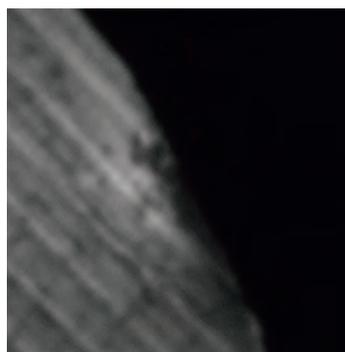


図5. 凸形状の発生例

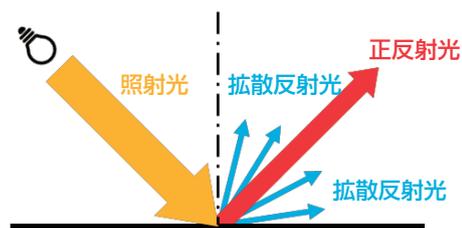


図6. 照射光に対する正反射光と拡散反射光

本件の対象である、アルミ製テンショナでの各反射光について、正常な切削面では反射光のほとんどは正反射光となり、拡散反射光は発生しづらい（鏡面反射する）と考えられる。対して、隆起した形状や凹んだ形状からなる不良箇所は、粗面であるため乱反射が起こりやすい、つまり拡散反射光が多く発生すると考えられる。前述の各反射光を表現するために、本件では「同軸落射照明」と「ローアングル照明」の2種類の照明を使用する。また、本件における各照明の使用方法を以下に示す。

(1) 同軸落射照明

テンショナ・同軸落射照明・カメラが同軸上になるように配置し、照射光をテンショナ切削面の垂直方向から照射する。前述の配置により、同軸落射照明からの照射光による正反射光をカメラにて受光する。

正常な切削面では、照射光が鏡面反射すると考えられるため、照射光のほとんどが正反射光となる。よって、画像上においては輝度値が高い（明るい）領域となる。また、凹凸形状からなる不良箇所では、照射光が乱反射し拡散反射光の割合が増加すると考えられるため、正反射光の割合が減少する。よって、画像上においては輝度値が低い（暗い）領域となる。

(2) ローアングル照明

テンショナ・ローアングル照明・カメラが同軸上になるように配置し、照射光をテンショナ切削面の斜め方向から照射する。前述の配置により、ローアングル照明からの照射光による拡散反射光をカメラにて受光する。

正常な切削面では、照射光が鏡面反射すると考えられるため、照射光のほとんどが正反射光として反射される。そのため、拡散反射光が発生しづらく、画像上においては輝度値が低い（暗い）領域となる。また、凹凸形状からなる不良箇所では、照射光が乱反射すると考えられるため、拡散反射光が発生しやすくなる。そのため、画像上においては輝度値が高い（明るい）領域となる。ただし拡散反射光については、凹凸形状により拡散度合が変化するため、本件では巣が暗く、圧痕・キズが明るく写るようにローアングル照明を配置する。

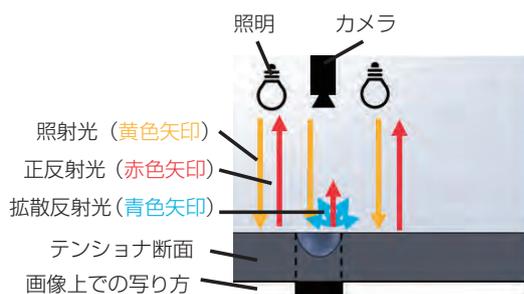


図7. 各反射光イメージ画像詳細

前述の2種類の照明を用いた、各不良の検出原理詳細を以降に示す。図7に示すように、各不良での反射光のイメージを表す図において、黄色矢印は照射光、赤色矢印は正反射光、水色矢印は拡散反射光をそれぞれ示す。また、図中の各反射光について、切削面に対して垂直方向に示す反射光はカメラに入射すると考えられる反射光であり、画像上での見え方を不良下部に示す。

3.1 巣検出原理

巣の形状としては2.1節に示す発生原因より、切削面上に空洞の一部が現れるため、切削面に対して凹んだ形状になると考えられる。また巣については切削加工により出現する（加工後の切削面への外的要因による発生ではない）不良のため、不良周辺の切削面には隆起した形状は発生しないと考えられる（本件では、ローアングル照明による拡散反射光がカメラに入射しづらいように照明を配置している）。

前述より、各照明にて撮影した画像上での巣不良は、

- (1) 同軸落射照明にて撮影した画像では、正反射光が反射しづらい、不良箇所の輝度値が切削面より低い（暗い）領域
- (2) ローアングル照明にて撮影した画像では、拡散反射光が反射しづらい、不良箇所の輝度値が切削面と同等となる領域

となると考えられる。また、(1)(2)の照明による反射光のイメージをそれぞれ図8、9に示す。

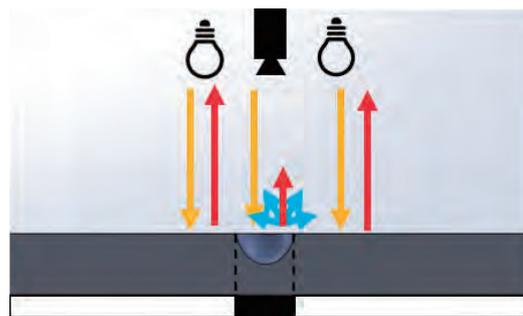


図8. 巣 同軸落射照明での反射光イメージ

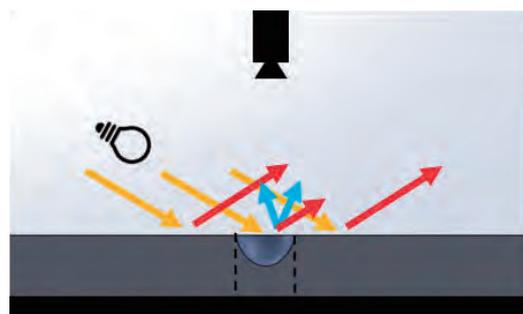


図9. 巣 ローアングル照明での反射光イメージ

前述の(1)(2)の照明にて撮影した巣不良箇所の画像をそれぞれ図10、11に示す(図1の巣を対象とする)。検出原理にて想定した通り、(1)同軸落射照明にて撮影した画像では切削面より暗く、(2)ローアングル照明にて撮影した画像では切削面より暗く不良箇所が現れている。

3.2 圧痕 検出原理

圧痕の形状としては2.2節に示す発生原因より、切削面に対して不良内部は凹凸形状、不良輪郭周辺は隆起した形状になると考えられる。

前述より、各照明にて撮影した画像上での圧痕不良は、(1)同軸落射照明にて撮影した画像では、正反射光が反

射しづらい、不良箇所の輝度値が切削面より低い(暗い)領域

(2)ローアングル照明にて撮影した画像では、拡散反射光が反射しやすい、不良箇所の輝度値が切削面より高い(明るい)領域

となると考えられる。また、(1)(2)の照明による反射光のイメージをそれぞれ図12、13に示す。

前述の(1)(2)の照明にて撮影した圧痕不良箇所の画像を図14、15にそれぞれ示す(図2の圧痕を対象とする)。検出原理にて想定した通り、(1)同軸落射照明にて撮影した画像では切削面より暗く、(2)ローアングル照明にて撮影した画像では切削面より明るく不良箇所が現れている。



図 10. 巣 同軸落射照明にて撮影

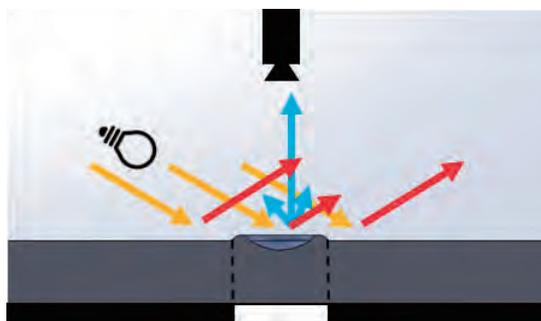


図 13. 圧痕 ローアングル照明での反射光イメージ

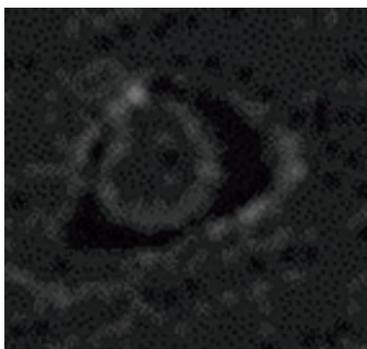


図 11. 巣 ローアングル照明にて撮影

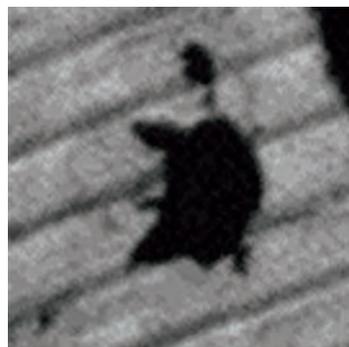


図 14. 圧痕 同軸落射照明にて撮影

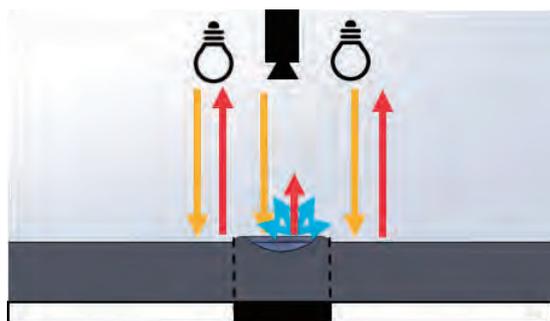


図 12. 圧痕 同軸落射照明での反射光イメージ

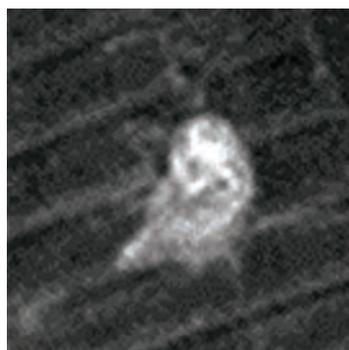


図 15. 圧痕 ローアングル照明にて撮影

3.3 キズ 検出原理

キズの形状としては2.3節に示す発生原因より、切削面に対して不良内部は凹凸形状、不良輪郭周辺は隆起した形状になると考えられる。

前述より、各照明にて撮影した画像上でのキズ領域は、

- (1) 同軸落射照明にて撮影した画像では、正反射光が反射しづらい、不良箇所の輝度値が切削面より低い（暗い）領域
- (2) ローアングル照明にて撮影した画像では、拡散反射光が反射しやすい、不良箇所の輝度値が切削面より高い（明るい）領域

となると考えられる。また、(1) (2) の照明による反射光のイメージをそれぞれ図16、17に示す。

前述の(1) (2) の照明にて撮影したキズ 不良箇所の画像を図18、19にそれぞれ示す（図3のキズを対象とする）。検出原理にて想定した通り、(1) 同軸落射照明にて撮影した画像では切削面より暗く、(2) ローアングル照明にて撮影した画像では切削面より明るく不良箇所が現れている。

また図20に示すキズのような、(1) 同軸落射照明にて撮影した画像では切削面より明るく、(2) ローアングル照明にて撮影した画像では切削面と同等の輝度で写るキズも存在した（図21、22参照）。前述のキズについては、想定発生原因に対して、不良内部が切削面に対して平行かつ、切削面より平面度が高いキズであると考えられる。ただし図21、22より、切削面との輝度差が現れているため、本キズも検出が可能である。

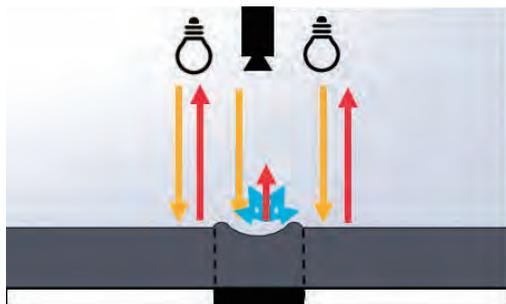


図 16. キズ 同軸落射照明での反射光イメージ

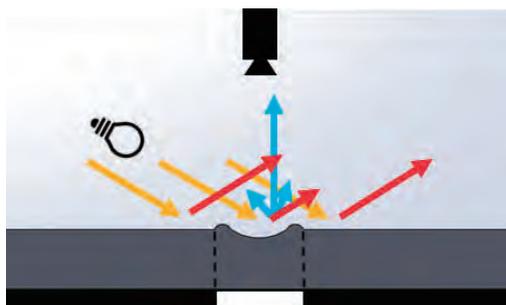


図 17. キズ ローアングル照明での反射光イメージ

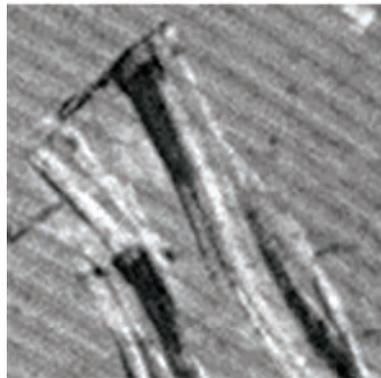


図 18. キズ 同軸落射照明にて撮影

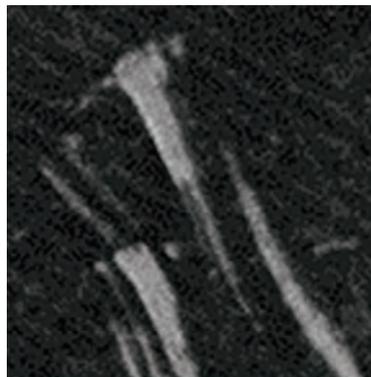


図 19. キズ ローアングル照明にて撮影

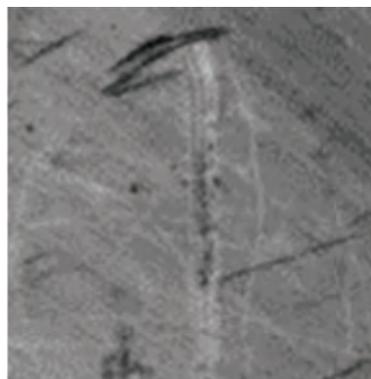


図 20. キズ 別パターン

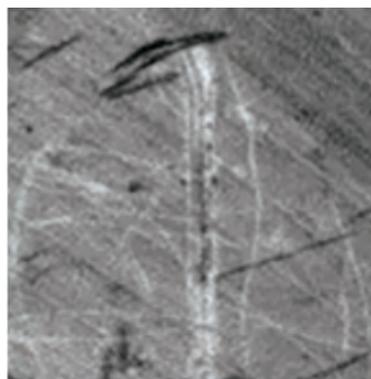


図 21. キズ 別パターン 同軸落射照明にて撮影

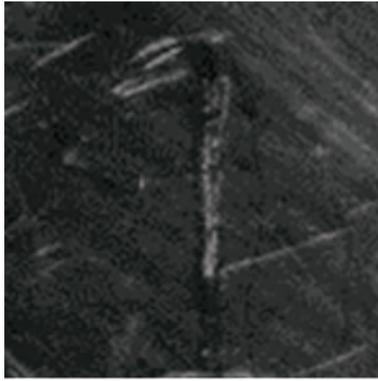


図 22. キズ 別パターン ローアングル照明にて撮影

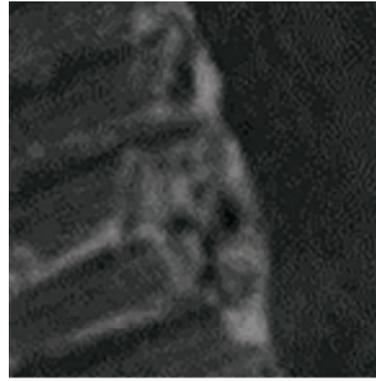


図 26. 欠け ローアングル照明にて撮影

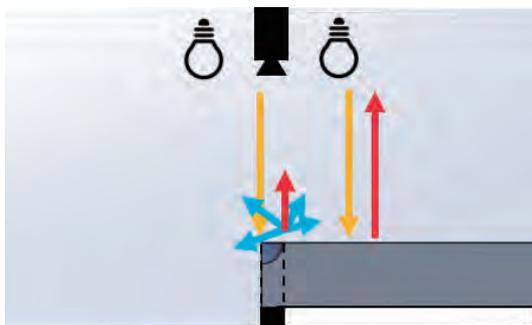


図 23. 欠け 同軸落射照明での反射光イメージ

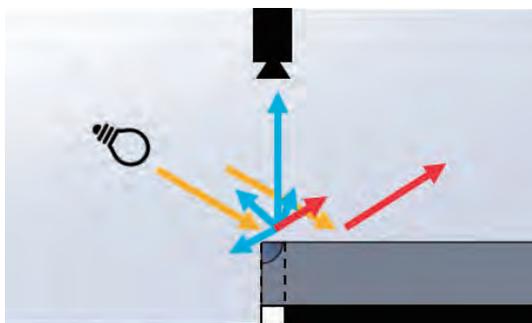


図 24. 欠け ローアングル照明での反射光イメージ

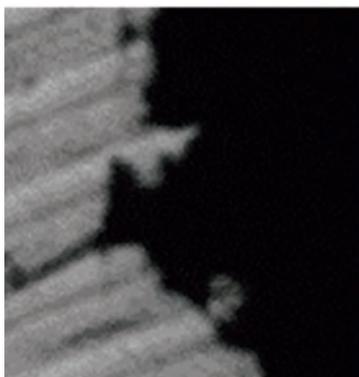


図 25. 欠け 同軸落射照明にて撮影

3.4 欠け 検出原理

欠けの形状としては2.4節に示す発生原因より、切削面輪郭部および周辺の切削面が、切削面及びその側面に対して凹んだ形状になると考えられる。

前述より、各照明にて撮影した画像上での欠け領域は、
 (1) 同軸落射照明にて撮影した画像では、正反射光が反射しづらい、不良箇所の輝度値が切削面より低い（暗い）領域

(2) ローアングル照明にて撮影した画像では、拡散反射光が反射しやすい、不良箇所の輝度値が切削面より高い（明るい）領域

となると考えられる。また、(1) (2) の照明による反射光のイメージをそれぞれ図23、24に示す。

前述の (1) (2) の照明にて撮影した欠け 不良箇所の画像を図25、26に示す（図4の欠けを対象とする）。検出原理にて想定した通り、(1) 同軸落射照明にて撮影した画像では切削面より暗く現れている。また、(2) ローアングル照明にて撮影した画像では、照射光を乱反射しやすい箇所については切削面より明るく不良箇所が現れている。

3.5 凸形状 検出原理

凸形状の形状としては2.5節に示す発生原因より、切削面輪郭部および周辺の切削面が、切削面に対して隆起した形状になると考えられる。

前述より、各照明にて撮影した画像上での凸形状領域は、
 (1) 同軸落射照明にて撮影した画像では、正反射光が反射しづらい、不良箇所の輝度値が切削面より低い（暗い）領域

(2) ローアングル照明にて撮影した画像では、拡散反射光が反射しやすい、不良箇所の輝度値が切削面より高い（明るい）領域

となると考えられる。(1) (2) の各照明による反射光のイメージを図27、28に示す。

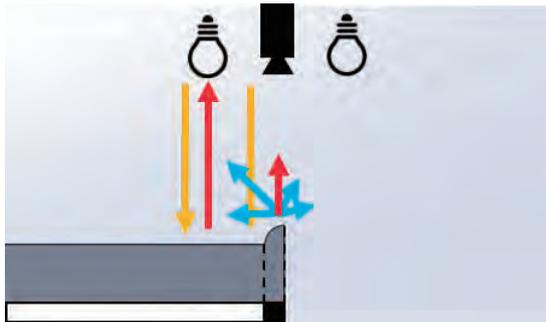


図 27. 凸形状 同軸落射照明での反射光イメージ

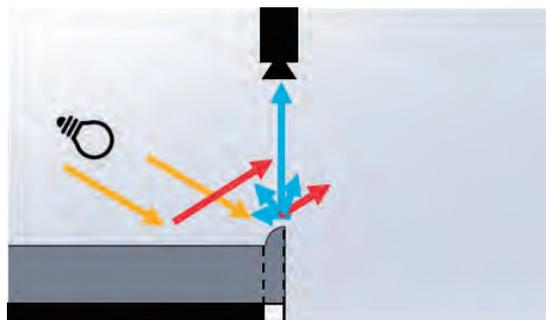


図 28. 凸形状 ローアングル照明での反射光イメージ

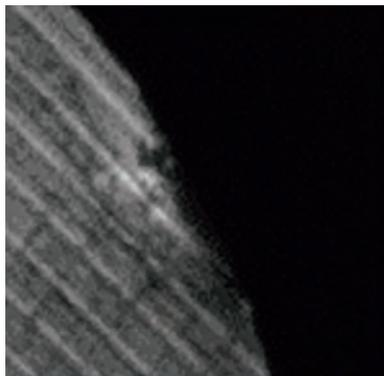


図 29. 凸形状 同軸落射照明にて撮影

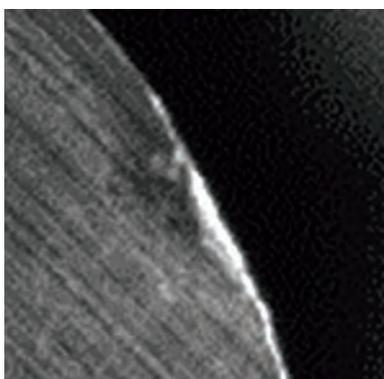


図 30. 凸形状 ローアングル照明にて撮影

前述の(1)(2)の照明にて撮影した凸形状 不良箇所
の画像を図29、30に示す(図5の凸形状を対象とする)。
検出原理にて想定した通り、(1)同軸落射照明にて撮影
した画像では切削面より暗く、(2)ローアングル照明にて撮
影した画像では切削面より明るく不良箇所が現れている。

4. 判別方法

3章 不良検出原理に示した内容を基に、画像処理に
よる不良種類の判別方法を以下に示す。

切削面状に発生する「巣」「圧痕」「キズ」について、
同軸落射照明にて撮影した画像において、切削面よりも
暗く写る領域のうち、ローアングル照明にて撮影した画
像において切削面と同等の明るさとなる領域を「巣」、
ローアングル照明にて撮影した画像において切削面より
も明るく写る領域のうち線状の領域を「キズ」、ローア
ングル照明にて撮影した画像において切削面よりも明る
く写る領域のうちキズ以外の領域を「圧痕」とすること
で、各不良種類の判別が可能であった。

切削面輪郭部に発生する「欠け」「凸形状」について、
同軸落射照明にて撮影した画像において切削面よりも暗
く写る領域、かつローアングル照明にて撮影した画像に
おいて切削面よりも明るく写る領域のうち、切削面輪郭
から凹んだ形状として切削面上に写る領域を「欠け」、
輪郭上に存在するものを「凸形状」とすることで、各不
良種類の判別が可能であった。

5. 外部機関 撮影画像との比較

「巣」「圧痕」「キズ」「欠け」「凸形状」について、外
部機関に検出方法を検討いただいた。光学系には同軸落
射照明を使用しており、本件と同様にテンショナ・同軸
落射照明・カメラが同軸上になるように配置し、照射光
を切削面の垂直方向から照射することで、反射光をカメ
ラにて受光している。

前述の光学系での撮影画像を図31~35に示し、それぞ
れ図1、2、20、4、5と同じ不良を撮影している。

図31の巣、図32の圧痕については、不良箇所が明瞭に
写っているが、不良判別が可能な差異が図31、32画像の
みでは存在しないと考えられるため、不良の判別が難し
いとする。

また、図33のキズ、図35の凸形状 撮影画像について、
周辺との明確な輝度値の差を光学系より作成できておら
ず、不良箇所が不明瞭のため、不良の判別が難しいと考
えられる。



図 31. 巣 外部機関撮影



図 32. 圧痕 外部機関撮影



図 33. キズ 外部機関撮影



図 34. 欠け 外部機関撮影

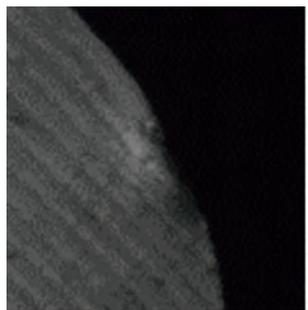


図 35. 凸形状 外部機関撮影

よって、本件の2種類の照明を組み合わせた光学系により撮影した画像を用いた不良判別は、図31～35に示した画像での不良判別に比べ、優位であると考えられる。

6. 終わりに

アルミ製テンションの切削面上に発生する「巣」「圧痕」「キズ」、切削面輪郭に発生する「欠け」「凸形状」のそれぞれを、本件の光学系を用いて判別することが可能であると考えられる。

よって本件の手法を用いることで、さまざまなアルミ製テンションの外観検査について、画像処理により不良種類を判別しての外観検査が実現できると考える。

用語解説

* 1 正反射光

ある面において、入射光の入射角と等しい反射角となる反射光のこと。鏡面反射光とも呼ばれ、一般的には鏡面や光沢面において発生しやすい。

* 2 拡散反射光

ある面において、入射光が乱反射しさまざまな方向に反射した光のこと。一般的には粗面や非光沢面において発生しやすい。

T-AstroX[®] における複数台車の運行制御について

Controlling the operation of multiple vehicles in T-AstroX

千田 暁慧^{*1}
Akisato CHIDA

生澤 隆広^{*1}
Takahiro IKEZAWA

岡田 優也^{*1}
Yuya OKADA

松村 翔太^{*1}
Shota MATSUMURA

近年、EC市場の成長に伴い即日配送などサービスの高度が求められ、物流センターの自動化・省人化ニーズが高まっている。そこで我々はピッキング作業の自動化装置として、T-AstroXを開発した。本システムは複数の台車が棚内を3次元方向に効率的に走行することで、高い能力を発揮することができる。そのためには、全体を管理しつつリアルタイムに制御を行うことが必要である。本報告ではT-AstroXの運行制御について開発を行ったので紹介する。

In recent years, the growth of the e-commerce market has increased demand for advanced services such as same-day delivery and this has increased the need for distribution center automation and labor-saving. In response to this, we developed T-AstroX as automation equipment for picking operations. This system demonstrates high performance by efficiently running a plurality of vehicles in three dimensions inside a shelf. To achieve this, it is necessary to manage the overall status whilst performing control in real time. This report introduces development we performed for T-AstroX operation control.

1. はじめに

1.1 T-AstroXの開発背景

2020年以降は、コロナ禍での巣ごもり需要もあり、BtoCにおけるEC^{*1}での物品購入取引は年々増加している¹⁾。ECの市場規模は2022年度では約14兆円となっており、店舗での購入も含めた全物品購入に対してのEC購入割合も増加し、9%以上へと成長している(図1)。ECで注文された商品は、注文内容に応じて物流センターで保管場所から集品され、梱包を行い出荷の手順を経て消費者のもとへ届けられる。EC需要の高まりに伴い各社でのサービス競争も過熱しており、配送料無料や即日配送などでの差別化も盛んになってきている。それらの結果として、物流センターではより効率的な業務を運用するために、人手が介在する作業に対して、自動化や省人化のニーズが増大している。

我々は、物流業界向けにリニソート^{®*2}を用いた仕分けを提案してきた。リニソートは高速仕分けが可能なシステムではあるが、人手作業が前提であると、高さ方向を有効に活用できていなかった。そこで、仕分け前後の作業自動化と、高さ空間の活用が可能なシステムをコンセプトとして、T-AstroXを開発した。



図1. 物販系分野のEC規模¹⁾

1.2 T-AstroXの概要

T-AstroXは、必要な商品を棚から出庫し作業場所へ搬送する一連の工程を自動化した装置である²⁾。また、高さ空間を生かした棚に入荷した商品を格納することで少ない敷地面積に高密度で保管することができる。作業者が広大な物流センターを歩き回る作業を自動化でき省人化につながる。

T-AstroXのレイアウトは3次元方向に移動可能な「台車」(図2)、商品を保管する「棚」、台車が昇り降りをする「昇降部」、作業者が注文内容に合わせて商品を取り出す「ワークステーション」、商品を補充する際の入庫や荷合わせが完了した商品を装置から排出する「入出庫口」、すべての棚に横断的にアクセスを可能にする

*1 研究開発センター エレクトロニクス開発部



図2. 台車外観

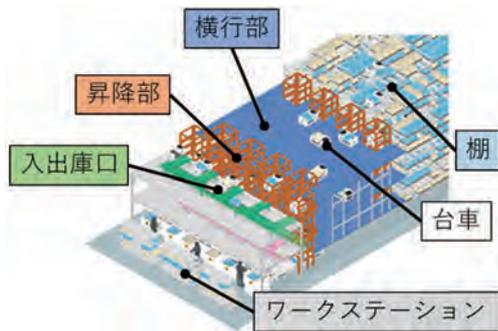


図3. T-AstroXの構成

経路「横行部」から構成される（図3）。

台車は棚内を昇降し、目的の商品が保管されている場所まで自動で走行する。その商品を棚から引き出し、作業者の待つワークステーションへ搬送する。ワークステーションでは作業者が商品を必要数量取り出し、商品を揃えるための空コンテナへ商品を入れる。注文された商品がすべて揃うと入出庫口へ搬送、排出され次工程へ送られる。

このシステムの大きな特徴は、台車が前後、左右、上下と縦横無尽に自立走行可能な点である。仮に台車が故障などで停止しても、他の正常状態の台車は稼働を続けることができるため、設備全体が停止して出荷が遅れるなどのリスクが低下する。

一般的な昇降リフトを用いた昇降動作では、1台ずつしか昇降できないため能力が落ちてしまう。しかし、T-AstroXでは台車自身がラック&ピニオンで昇降する機能を有するため複数台が昇降部へ入り動作することができ、台車の待ち時間を減らして効率よく作業ができる。

また、すでに現場で利用されている汎用コンテナや段ボールも搬送・収納ができるように、専用の移載トレイを用いることで既存物流現場でも採用しやすくした。

本システムでは、管理する台車が複数台になるため、それぞれの台車への経路計画や台車への指示を短時間で行うことで効率的な搬送が実現できる。

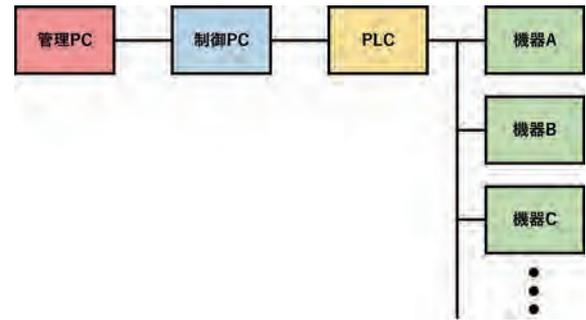


図4. 一般的なネットワーク構成

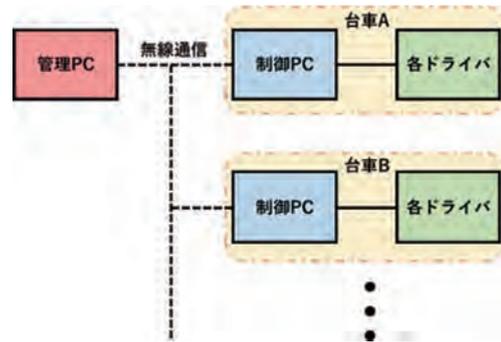


図5. T-AstroXのネットワーク構成

2. T-AstroXにおける制御の課題

2.1 一般的な搬送設備の制御方法

一般的な搬送設備では、ソータやコンベヤのように決められた経路を周回する装置や、ピッキングロボットのように一定範囲内でワークを搬送する装置が多数を占めている。これらの装置では、機器ごとに動作の範囲が限定されているため、制御方法はシンプルになる場合が多い。

具体例として、流通業界向け商品のリソースでのワーク制御では、一定経路を周回して指定した箇所でのトレイを傾けて仕分けを行っている。これらの装置では、ワークを搬送する一連の動作が毎回同一で一定経路であるため、毎回経路を計算せずに制御が行える。

これらの搬送設備では図4に示すように、各機器を制御するPLCに対して、制御の指示を行う制御PCと、搬送指示を管理する管理PCで構成することが多い。管理PCでは、他設備との連携を取りながら指示の作成タイミングを管理しつつ、制御PCへと実際の動きに関わる指示を送信する。制御PCが指示を受け取り、PLCが理解できる形へと内部で変換を行い、PLCがそれぞれの機器に対して送信することで期待する動作を実現する。

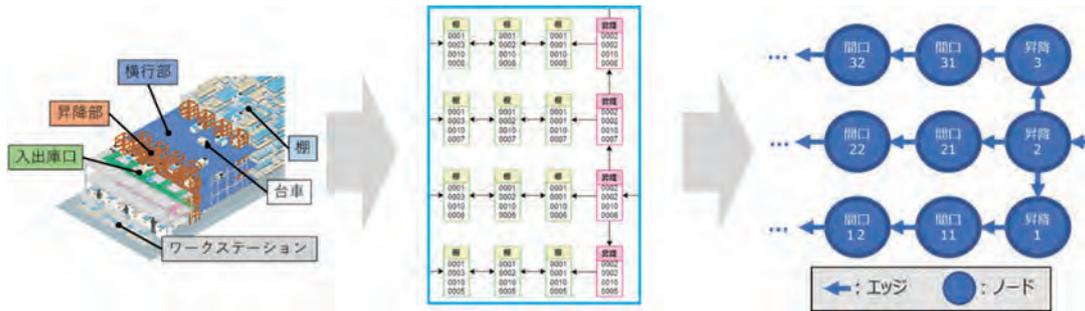


図 6. グラフ理論の適用

左) 装置全体図、中) 作業ポイントへのアドレス割付、右) アドレスの接続性をノード・エッジで表現

2.2 T-AstroXにおける制御の特徴

T-AstroX では、複数の台車が装置の中に存在しており、それぞれの行先が棚やワークステーションの状況により変化する。また、台車が棚内を3次元に自在に移動する関係上、管理PCとの通信は有線ではなく無線を介して行われ、各々充電式バッテリーを搭載することで台車単体での動作が可能となっている。

台車は可能な限りのコンパクト化と重量の軽減が求められるため、冗長な機器をすべて排除する構想の元にPCで制御を行うことや、基板を開発・導入するなど機器の削減を行った。

結果として図5に示すように、台車個体の制御を司る制御PCを台車内に搭載し、それら複数台車への搬送指示を司る管理PCでシステムを構成した。管理PCでは、複数台車の経路を算出し、動作タイミングを管理しつつ搬送指示を送信する。制御PCは管理PCから受信した搬送指示をモータが理解できる形へと変換・コントロールすることで動作する。

2.3 T-AstroXにおける運行制御の課題

T-AstroXの運行制御では、現在地から目的地までの経路が複数存在し、同時に複数の台車を制御する必要がある。台車の総数としては、100台規模を想定しており、設備規模が大きくなるほど、台車の渋滞や衝突が発生しやすくなり、配車計画の計算量も増加する。

台車1台の搬送指示では、周囲の環境などを考慮せずに単純に最短経路を選択すればよい。しかし、複数台の場合は周囲の台車との位置関係に依存してしまう。例えば、前方の台車が作業時に停止し、後続台車が滞留することで渋滞が発生する。この渋滞は、搬送オーダーの偏りや、人手の作業が存在する箇所での作業待ちで多く発生すると想定される。また、本システムでは、複数の台車が同一の経路を通る場合や、台車同士が複数の異なる経路から同一の地点への合流が発生し、台車同士が走行中

に衝突してしまうことも考えられる。よって、効率的な運用には渋滞や衝突の回避を考慮した各台車を一括管理する運行制御が必要である。

3. ダイクストラ法を用いた経路探索

3.1 グラフ理論の適用

前章での課題に対して、設備の期待通りの能力を発揮するために、効率の良い経路探索を行う必要がある。

本システムでは、走行と昇降が可能な台車のため動作経路も3次元的に複雑になる。そこで動作レイアウト構成を抽象化できPC上で計算が可能なグラフ理論を適用することとした。グラフ理論とは、事象を表現するノードと事象間の関係や接続を表現するエッジの集合により、事象の関係を抽象化し分析する数学理論である。例えば、駅をノード、線路をエッジとすると、鉄道やバスの路線図を表現することができる。

本システムでは、荷物の移載や昇降といった動作の基準となる位置をノード、台車の動作経路をエッジとしてこの理論に落とし込むことで、台車走行のレイアウト構成を抽象化した(図6)。また、ノードには3次元座標を与え、エッジには距離を付加情報として与える。これにより、ノード間の位置関係や距離を簡単に掴み、任意のノード間の最短経路を計算することが可能になる。

3.2 ダイクストラ法の適用

運行制御における経路探索では、実際の運用に耐えることができる短時間での計算が求められる。経路探索手法のひとつとして、網羅的に探索を行う全探索が思いつくが、設備規模の増加に伴い指数関数的に計算時間が増加するため、現実的ではない。そこで、本システムでは、処理時間の小さい経路探索の手法としてダイクストラ法を採用する³⁾。ダイクストラ法は、グラフ理論における代表的な最短経路探索アルゴリズムであり、日常的

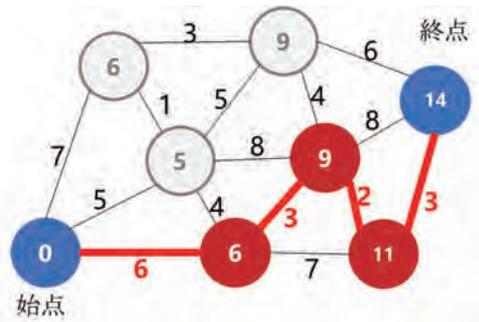


図7. ダイクストラ法による経路探索

な部分でもカーナビなど幅広い範囲で応用されている。

図7にダイクストラ法による最短経路探索の概要を示す。各円がノード、ノード同士を繋いでいる線がエッジを示しており、エッジにはコストが付与されている。ダイクストラ法では、各ノードへの最短経路を、コストを参照し、始点の周辺から一カ所ずつ確定する。始点からの最短経路が確定したノードの範囲を順次広げること、終点までの最短経路を計算する。小さい順に順次に探索を行うため、不要な大周りの経路の算出を避けることができ、計算量を圧縮することができる。

一般的な利用例としては、鉄道の乗り換え案内にも用いられている。駅をノード、路線をエッジ、そしてエッジのコストを距離や運賃、乗車時間として設定することで、所望のコスト条件をユーザーが選択して最短コスト経路を計算できる。

一般的にダイクストラ法では、計算の削減量として、ノード数 V の場合に $O(V!)$ から $O(V^2)$ へと圧縮することができる。例えば、ノード数 V が100とすると、上記より計算量は $O(V!)$ の場合、約 9.3×10^{157} であり、計算機での計算は現実的ではない。しかし、 $O(V^2)$ では、 1.0×10^4 となり短時間で計算可能な程度まで計算量が減る。

この手法を用いることで、実際の位置関係に基づく最短経路探索をノードのコストに距離を用いることで、実際の運用においても短時間で行うことができると考えた。

4. 走行経路の検討

4.1 走行経路の一方化

前章で述べたダイクストラ法により、始点と終点を選択することで特定の評価コストで、最小コストの経路算出が可能となる。今回のシステムでは、管理する台車が複数台になるため渋滞が起きると全体としての能力低下につながる。

そこで、渋滞回避の方法として、走行の経路にルールを設定することとした。まず、棚内の走行経路は極力一

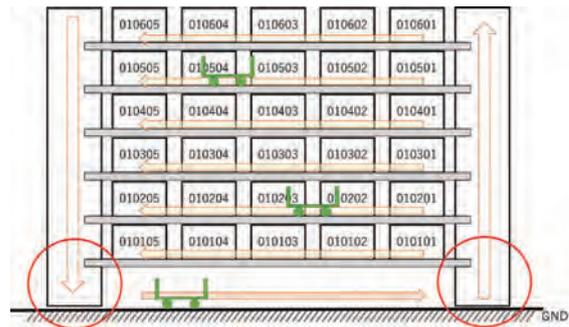


図8. 棚単純経路（棚側面図）

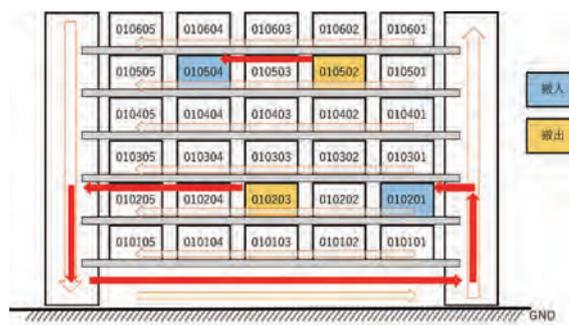


図9. 効率的な棚内搬送の検討

方通行にする。ここで、双方向の移動を許容すると、先方の台車が戻ってくる可能性が発生してしまう。複数台がシステムに存在する場合には、後続の台車はそのエリアに入るとデッドロック*³が発生してしまう恐れが出てくる。そのため、デッドロックでシステムが動作不能になることを防ぐために、そのエリアに入らないように制御しなくてはならない。

また、走行路の途中においても台車は荷物の出し入れを行うため、台車が作業中は走行をせずに停止する。後続は先方の台車と衝突しない個所で待たせる必要があるが、その停止距離の間隔が広くなると、棚の中での台車密度が下がってしまい、同時に稼働させることができる台車数に制限がかかってしまう。

棚内の走行と棚前後の昇降部のレイアウトを考えた場合での、単純な一方化での経路を図示すると図8となる。このような経路であれば、合流、分岐の地点を切り分けることができ、一カ所で合流+分岐が混ざる複雑な経路が現れなくなる。また、制御方法としても前方に台車があるかどうかの確認だけでよくなるため、制御手法を単純にすることも可能となる。

しかしながら、同時に棚内で台車を複数台稼働させることを考えると図内の赤丸で囲んだ昇降部の下部において、棚内で作業を行った全台車が通過する箇所が生じる。台車が集中するという事は、システム全体の限界値を決めてしまうボトルネック*⁴となる。この渋滞を避



図10. 小ループ経路レイアウト

けるためには、台車の頻度を減らし、走行密度を下げることを考える必要がある。

4.2 小ループ経路レイアウトの追加

台車の作業運用効率を上げるために、棚内での荷物を置く動作と荷物を取る動作の連動を考える。棚への行きも帰りも荷物の搬送をさせることで、片道が空の状態を回避できるため、台車に2倍の作業を行わせることが可能となる。

前述の経路であると、一方通行の上流に荷物を置いて(搬入)下流の荷物を取る(搬出)ことは一連の流れで作業は行える(図9 上部)。しかしながら、下流に荷物を置き上流の荷物を取る場合は、下流から上流まで大周りで1周する必要が出てしまう(図9 下部)。

ここで大周りを回避することができれば、走行距離を短くすることが可能となる。そこで、上下に移動可能な昇降部を前後2カ所ずつ持つ機械配置を採用する(図10)。そのうえ、棚と内側昇降部でループを構成する形で一方の走行方向へと変更を行う。内側にループが含まれているため棚内での荷物配置で上流下流があっても大周りをせずとも、内側のループ内での移動に収めることができる。

走行する経路が短くなるため、一つの処理をする時間を短縮することが可能となる。また、前述のボトルネックになっていた箇所の台車の通過量も減少させることができ、理論値として2/3に減らすことが可能にもなる。同じ仕事量に対して通過量が減るということは、通過量(台車数)を増やすことで、全体能力を上げる余地があるということにもなる。

5. 実運用に向けて

5.1 運行制御の環境構築と実機への適用

前章までの手法による配車制御が成立するかを検証するために、プログラムを作成した。本システムの運行制御では、管理PCが台車同士の干渉回避のために、台車がどの時刻にどこへ移動するかという計画(以下、動作計画)を行い、台車に伝達する。動作計画の作成において



図11. 展示設備

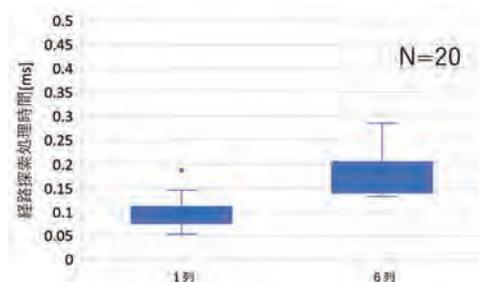


図12. ダイクストラ法による経路探索の処理時間

は、前章までの手法を用いて計算した最短経路を走行させるように台車への指令を作成し、TCP通信を使用して信号をWi-Fi^{*5}で無線送信する。管理PC・台車PCのOSにはUbuntu^{*6}を用いた。また、内部のソフトウェアは、Python^{*7}言語にてプログラムを作成した。グラフ理論の実装には、公開されているライブラリ^{*8}を一部適用することで、開発工数の削減、計算処理の高速化を行った。

実機として、5m×20mの空間にワークステーション、横行部、棚を構築し、台車3台の環境を準備した。作成したプログラムを用いて台車への搬送を指示し、動作確認を行った。結果として、搬送オーダーを基に経路の算出を行い、各台車を制御することができた。また、台車システムとの連携により、搬送オーダーに基づく商品の搬送ができた。現在、埼玉工場にて展示設備として稼働している(図11)。

5.2 大規模環境でのシミュレート

前節では台車3台の実機にて動作確認を行ったが、実設備では台車100台規模を想定して開発を進めている。この規模で、実運用に耐える計算時間にて経路探索可能か検証する必要がある。

そこで、棚内の走行路が6列、棚が約8600間口の規模のシミュレーション環境を構築した。走行路に対して左右に荷物を配置できるため、ノード数としては約2500のグラフ構築となる。このグラフを用いて、ダイクストラ法による経路探索をPC上でシミュレートし、要する計算時間を計測した。試験で用いたPCのCPUは、Intel[®] Core[™]^{*9}

i7-13700を用いた。

結果として、6列の大規模の環境において、0.18msで経路探索を算出した。参考に1列規模でも計測を行ったところ、0.08msにて計算が行えた(図12)。これは、計算前の処理に時間を有している点も含まれておりダイクストラ法で計算されている部分はより小さい。

目標を1ms/回での算出を目標としていたため、システムとしての運用においても十分に利用可能であることが明らかとなった。

6. おわりに

本報告では、T-AstroXにおける複数台車の運行制御手法について説明した。台車の走行経路の算出にグラフ理論のダイクストラ法を適用することで、計算量の圧縮を行った。また、走行経路を一方向に制限しレイアウトを検討することで台車密度を上げることができ搬送効率を向上させる方法を実現した。

これらの手法を用いて実機の台車に実装し、問題なく台車を制御できることが確認できた。また、PC上の大規模シミュレートでも0.18msと運用可能時間であった。

今後の取り組みとして、特定の台車に異常が発生した場合にシステムが全停止するのではなく、正常な台車は動作経路を変更し作業を継続させ、システムとして連続稼働できる手法についても検討していく。

本システムは、空間に対してアドレスを振り、グラフ表現に落とし込むことで実現している。本報告ではT-AstroXの運行システムとして紹介したが、この手法の適応範囲は広く他の設備に関しても適応は可能であると考えている。通常、物流センターでは複数の搬送設備で構成されており、その連携によって運用されている。しかし、設備間の連携不足で期待通りの能力が発揮できないこともある。本手法をさまざまな搬送設備に適応・連動させることで、より無駄のない搬送設備群を実現し、今後の自動化および省人化に大きく貢献していけると考えている。

参考文献

- 1) 経済産業省商務情報政策局情報経済課, 令和4年度電子商取引に関する市場調査報告書, 2023, <https://www.meti.go.jp/press/2023/08/20230831002/20230831002-1.pdf> (2024年5月現在)
- 2) 伊達洋貴, 町田敏宏, 岡本幸寛, 大西淳之, 濱田洋昭, 保管機能付きピッキング装置「T-AstroX[®]」の開発, TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.17, No.1, 2023, p.9-14
- 3) E.W.Dijkstra, A note on two problems in connexion with graphs, Numer.Math, Vol.1, 1959, p.269-271

用語解説

* 1 EC

Electronic Commerceの略で、インターネットを介して行われる物やサービスの取引を指す。具体的には、オンラインショッピングサイトやオークションサイトが含まれる。

* 2 リニソート

リアモータ駆動を採用したループ式チルトトレイ式自動仕分け機。

* 3 デッドロック

行き詰まり・膠着状態を表す。今回の場合では、先行台車が後退し、後続台車が前進したいがそれぞれ台車が存在して動けなくなることを指す。

* 4 ボトルネック

交通工学用語で、前後と比較して相対的に交通容量が低い道路区間または箇所を指す。交通容量が最小の区間で、その交通容量を超える需要が生じると、そこを先頭として交通渋滞が発生する。

* 5 Wi-Fi

Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標。

* 6 Ubuntu

UbuntuはCanonical Ltdの登録商標。

* 7 Python

PythonはPython Software Ltdの登録商標。

* 8 ライブラリ

プログラムを再利用可能な形でひとまとまりにしたものであり、他のプログラムから呼び出して利用できるように部品化されたもの。一般的に処理の高速化が可能で、開発速度も向上できる。

* 9 Intel[®] Core™

Intelはインテル・コーポレーションの登録商標。

【特許登録】