

# コア技術を応用した パーキングロッククラッチの開発

Application of Core Technology in Development of Clutch for Parking Lock Systems

石原 悠真<sup>※1</sup>  
Yuma ISHIHARA

金子 士津真<sup>※1</sup>  
Shizuma KANEKO

近年、地球温暖化対策の一環として、温室効果ガスの一種である二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出削減が国際的に求められている。特に、運輸部門においては自動車が出量の大部分を占めており、その低減が喫緊の課題となっている。このような背景の下、自動車の低燃費化に資する技術の開発が強く求められている。そこで、当社のコア技術であるカムクラッチの原理を応用し、ローララチェット方式を採用した新たなパーキングロッククラッチを開発した。

In recent years, there have been international calls for the reduction of emissions of the greenhouse gas carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) as one of the measures against global warming. In the transportation sector, automobiles account for the majority of the CO<sub>2</sub> emissions and the reduction of those emissions has become an urgent issue. Against this backdrop, there are strong demands for the development of technologies that contribute to the improvement of vehicle fuel efficiency. In response to these demands, we have applied the principles of a cam clutch, which is a core technology of our company, and developed a new clutch for a parking lock system that uses a roller ratchet mechanism.

## 1. はじめに

近年、地球温暖化や大気汚染といった環境問題が深刻化しており、これらの課題に対処するため、温室効果ガスの一種である二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出削減が国際的に推進されている。図1に示すように、2023年度における日本のCO<sub>2</sub>排出量のうち、運輸部門は全体の19.2%を占めている。その運輸部門においては、自動車からの排出量が85.7%と大部分を占めており、自動車の環境負荷が依然として大きいことが分かる。

このような背景から、持続可能な社会の実現に向けて、自動車の低燃費化は極めて重要な課題であるといえる。

自動車におけるパーキングロックシステム（以下、PLS）は、車両の静止状態を保持し、安全性を確保する上で不可欠な要素の一つである。しかし、PLSは複数の構成部品から構成されており、トランスミッションやe-Axle<sup>\*1</sup>内での専有面積が大きく、パワートレインユニット全体の小型化を進める上で一つの課題となっている。

そこで、当社のコア技術であるカムクラッチの原理を応用し、ローララチェット方式を採用した新型パーキングロッククラッチを開発した。これによって小型化、すなわちパワートレインの軽量化による低燃費化に貢献する。

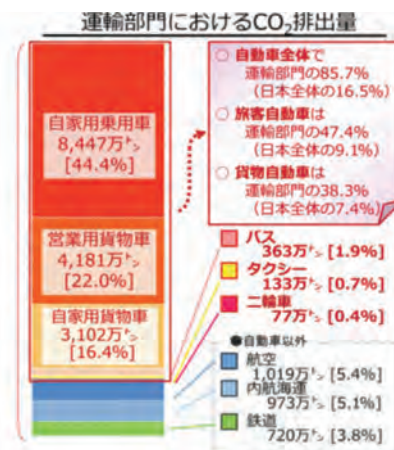
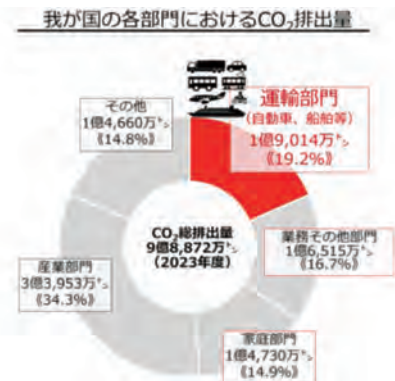


図1. 運輸部門における二酸化炭素排出量<sup>1)</sup>

※1 モビリティ事業部 技術部

## 既存パーキングロックシステム

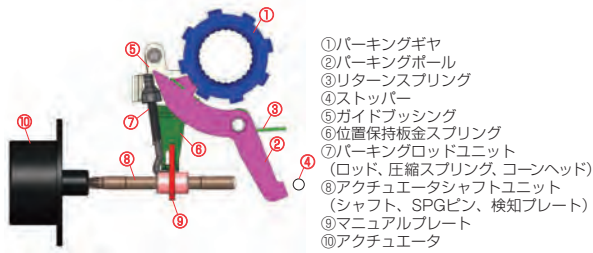


図2. 既存パーキングロックシステムの構成

## 新構造パーキングロックシステム

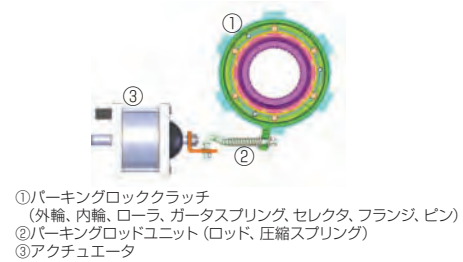


図3. 新構造パーキングロックシステムの構成

## 2. PLSの概要

### 2.1 既存 PLS の機構、構成

PLSとは、AT車およびxEV<sup>※2</sup>においてシフトレバーがPレンジに設定された際に、車輪の回転を防止するために、トランスミッションまたはe-Axle内部で動力伝達系をロックする機構である。既存のPLSは、図2に示すように、合計10種類の部品およびユニットで構成されており、その構成の複雑さと構成要素の多さが、装置の小型化や軽量化を進める上での制約要因となっている。

### 2.2 PLS の役割

PLSに求められる主な機能は以下の4点である。

第1はロックモードで、シフトレバーがPレンジにある停車時に、車輪をロックし、車両の静止状態を保持する。

第2はフリーモードで、Pレンジ以外の走行レンジにおいては、車輪の回転を妨げず、ロックが解除された状態を維持する。

第3はロック待機モードで、Pレンジに切り替えた際、ギヤが噛み合わない位相であっても、車軸が回転することでスムーズにロックモードへ移行できる。

第4は誤作動防止機構で、走行中に誤ってシフトレバーをPレンジに操作した場合であっても、ロック機構が作動せずラッチングを発生させることにより、誤作動を防止する。

#### 2.2.1 ロックモード

シフトレバーがPレンジに設定された停車時には、車輪の回転を機械的にロックするモードである。本モードでは、図2の⑦パーキングロッドユニットが⑤ガイドブッシングを介して②パーキングポールを押し出し、車軸とスプライン嵌合された①パーキングギヤの歯部に②パーキングポールが噛み合うことで、車輪の回転がロックされる。

### 2.2.2 フリーモード

Pレンジ以外の走行レンジにおいては、車輪の回転をロックしない状態を維持する必要がある。本モードでは、③リターンズpringの復元力により、②パーキングポールは①パーキングギヤの歯部と噛み合わない位置に保持されており、これにより車軸の回転が確保されている。

### 2.2.3 ロック待機モード

①パーキングギヤと②パーキングポールの歯先が噛み合わない位相にある場合であっても、車軸の回転に伴いスムーズにロックモードへ移行可能とするモードである。位相がずれている状態では⑦パーキングロッドユニットの圧縮springが圧縮された状態となり、②パーキングポールは一時的に待機位置に保持される。その後、ギヤとポールの噛み合いが可能な位置に到達すると、圧縮springの圧縮が解放され、②パーキングポールが押し出され、スムーズにロックモードへと移行する構造となっている。

### 2.2.4 誤作動防止機構

走行中に誤ってシフトレバーをPレンジに切り替えた場合、PLSが作動して車軸を強制的にロックすると、大きな衝撃が発生し、PLSの構成部品が損傷するおそれがある。また、車両の急停止により乗員が負傷するリスクも高まる。このような事態を防止するため、車両が所定の速度以上では、②パーキングポールが①パーキングギヤの歯部に接触しても噛み合うことなく弾かれる構造となっており、ロックが作動しないよう設計されている。

## 3. 新構造PLSの基本仕様

### 3.1 新構造 PLS の機構、構成

新構造 PLS は、図3に示すように、3種類の部品およびユニットで構成されている<sup>2)</sup>。このうち、①パーキングロッククラッチ（以下、PLC）は、図4に示すように、外輪、内輪、ローラ、ガータspring、セクタ、フ

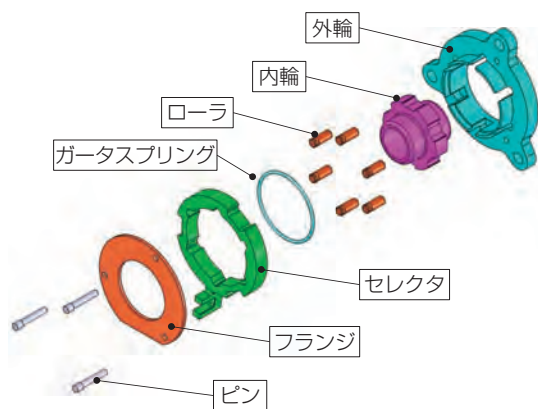


図4. パーキングロッククラッチの構成

ランジ、およびピンから構成されるユニットであり、新構造 PLS で2.2節に記載した PLS の各機能を満足することが可能である。

既存の PLS では、パーキングギヤとパーキングポールを噛み合わせることで車輪をロックしていた。一方で、新構造においては、図5に示すようにローラを外輪、内輪およびセレクタと噛み合わせることで車輪の回転をロックする。また、PLC におけるローラの位置をセレクタによって制御することで、ロックモードおよびフリーモードの切り替えを可能としている。

### 3.2 新構造 PLS における各役割

#### 3.2.1 ロックモード (図6)

外輪は非回転部品 (例: ケース) にボルト締結され、固定されている。内輪は車軸とスプライン嵌合されており、その内輪の溝に嵌ったローラが、外輪、内輪、セレクタの3部品によって挟み込まれる構造となっている。この構造により、ローラが拘束され、車輪の回転を機械的にロックすることが可能となる。さらに、ローラの飛び出しはセレクタによって拘束されており、車輪からトルクが入力された場合でも、ロック状態が維持される。このロックモードへの移行は、パーキングロッドユニットによってセレクタが回転駆動され、セレクタの斜面部がローラを内輪の溝方向へと押し込むことで達成される。

#### 3.2.2 フリーモード (図7)

外輪およびセレクタに設けられたポケット部にローラが逃げ込むことで、車軸とスプライン嵌合された内輪は外輪との噛み合いを持たず、車輪が回転可能なフリーモードとなる。さらに、PLC 内に配置されたガータスプリングがローラをポケット方向へ押し出す荷重を与え

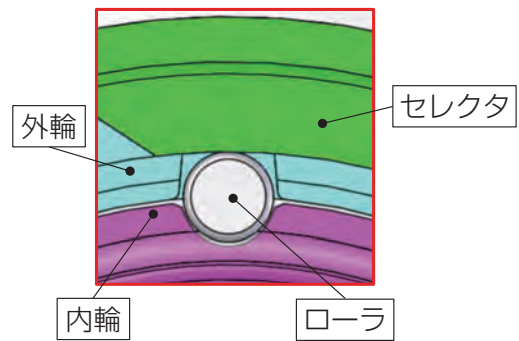


図5. ローラの噛み合い

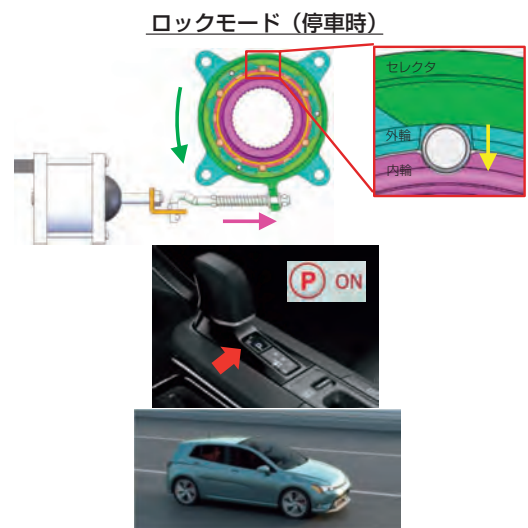


図6. ロックモードの新構造 PLS とシフトレバー<sup>3)</sup>

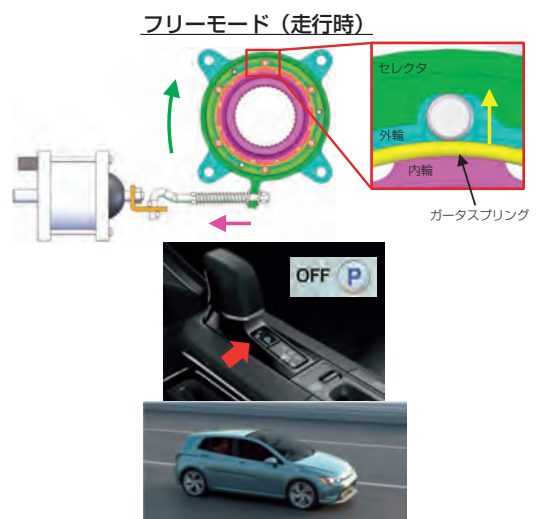


図7. フリーモードの新構造 PLS とシフトレバー

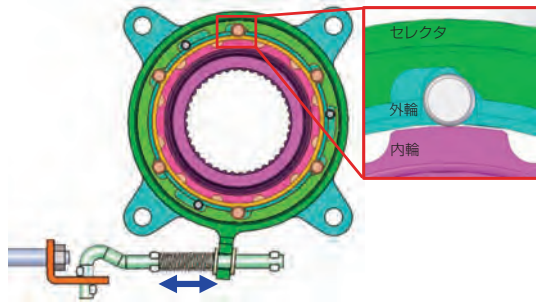


図8. 新構造 PLS のロック待機モード

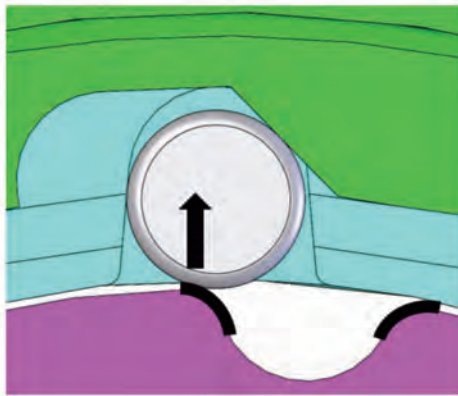


図9. 誤作動防止機構

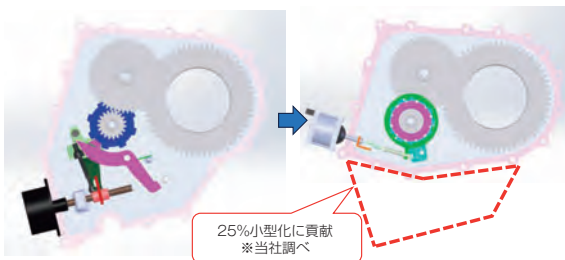


図10. パーキングロックのレイアウト図

ており、これにより走行中の振動や外的要因によってローラが誤って噛み合うことを防ぎ、意図しないロックの発生を抑制している。

### 3.2.3 ロック待機モード (図8)

新構造 PLS は、既存の PLS と同様に、内輪の溝とローラの位相が一致しない場合には、パーキングロッドユニット内に組み込まれた圧縮スプリングが圧縮状態で待機する構造となっている。位相が一致した際には、圧縮されていた圧縮スプリングが解放され、その復元力によりセレクタがローラを押し出すことで、ローラと内輪の溝が噛み合い、ロックが実現される。

### 3.2.4 誤作動防止機構 (図9)

内輪溝の角部には面取り加工が施されており、これにより車両が一定速度以上で走行している場合には、ローラがこの面取り部によって弾かれる構造となっている。これにより、誤作動による急激なロックが発生することを防止している。ロックが実際に成立する回転速度は、内輪およびセレクタの形状、ならびにパーキングロッドユニットに組み込まれた圧縮スプリングのバネ定数によって調整が可能である。

### 3.3 新構造 PLS のメリット

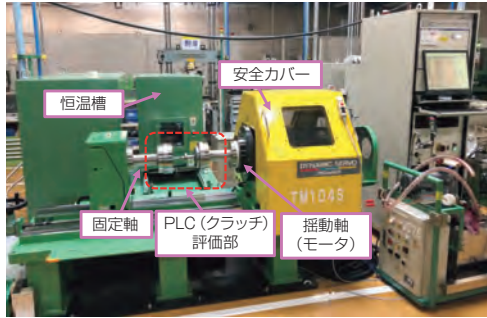
新構造 PLS は、PLS 特有の機能を小型クラッチユニット内に集約することで、従来の PLS より構成部品およびユニット点数の削減が可能となる。このクラッチのユニット化により、図10に示すように、ケース内での PLS 専用の占有面積を約25%削減することができる。これにより、システム全体の小型化が実現され低燃費化に貢献する。また、クラッチのユニット化により部品点数を約70%削減することができ、ケースに取り付ける個所も削減されることで、組立工数の低減およびケース加工コストの低減、作業の容易化にも寄与する(数値は当社調べ)。

## 4. 社内評価

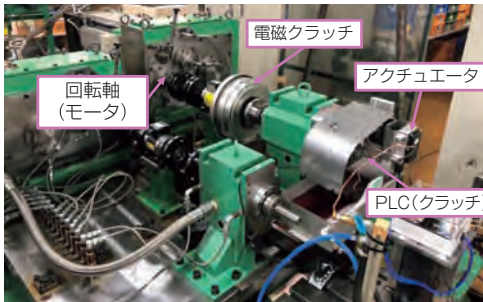
前述の3.2節にて述べた PLC の各機能に対し社内評価を通じて機能性および耐久性の検証を実施した。評価項目の概要については表1に示す。なお、表1に記載されているトルク等の試験条件は一例であり、代表的な設

表1. 社内評価項目

試験名	試験概要 (一例)	試験機名	判定結果
<b>1. ギヤシステムをロックすること</b>			
トルク負荷試験	耐久試験 300Nm at 400,000回 (Max.トルク) 700Nm at 6,000回 (衝撃入力)	トルク負荷試験機	合格 クラッチ破損無し。 摩耗量0.01mm以下
ロック待機	機能試験 ロック待機機能の確認	切替試験機	合格
誤作動防止	機能試験 300min <sup>-1</sup> 以下でロックする 回転数の確認	切替試験機	合格 300min <sup>-1</sup> 以下で ロックを確認
<b>2. ギヤシステムをロックしないこと</b>			
空転試験	機能試験、耐久試験 14,000min <sup>-1</sup> で内輪を回転させる	空転試験機	合格 異常な振動や過大な 摩耗無し
誤作動防止	機能試験 300min <sup>-1</sup> 以上でロックしない ことを確認	切替試験機	合格 300min <sup>-1</sup> 以上で ロック無し
<b>3. 確実にクラッチのモード切替を行うこと</b>			
セレクタロック解除	機能試験 300Nm負荷時のセレクタ 推力確認	切替試験機	合格 アクチュエータ トルク15Nm以下
セレクタ切替	耐久試験 0Nm at 400,000回 (待機/解除) 300Nm at 400,000回 (解除)	切替試験機	合格 セレクタ破損無し



(a) トルク負荷試験機



(b) セレクタ切替試験機  
図11. 社内評価試験機 (一例)

定値を示している。図11に示すような試験機を用いて全て社内でも試験可能である。以下に、評価項目の中からPLSとして特に重要と考えられる評価項目を抜粋し、その内容を紹介する。

#### 4.1 誤作動防止試験

本試験は、走行中に誤ってシフトレバーをPレンジに操作した状況を想定したものである。試験中の内輪の回転数の変化の一例を図12に示す。モータ回転速度を $1000\text{min}^{-1}$ に設定した状態でモータへの電流供給を停止し、それと同時にPLCのモードをフリーからロックへと切り替える。これにより、回転速度が徐々に減少し、所定の回転速度でロックモードへと移行する挙動を観察する。ロックモードへの移行が、所定の速度以下で行われること、ならびに所定の繰り返し試験後においてもPLCの機能が損なわれず、構成部品に破損が認められないことが確認できた。

#### 4.2 セレクタ切替試験

本試験は、セレクタポジションを操作してロックモードおよびフリーモードを繰り返し切り替えることにより、機構の作動性および耐久性を検証するものである。試験の手順を図13に示す。まず、①ロックモードにおいて内輪にトルクを付与した状態で、セレクタを作動させフリーモードへ移行する。次に、②フリーモード移行

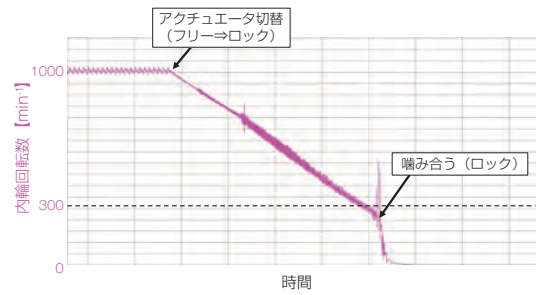


図12. 誤作動防止試験の内輪回転数の変化

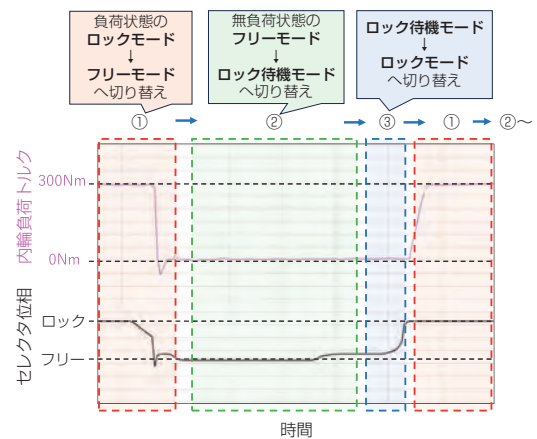


図13. セレクタ切替試験の流れ

後に内輪へのトルクをゼロとし、セレクタをロック待機モードへ移行させる。続いて、③内輪を回転させ、ローラが噛み合うタイミングでロックモードへと自動的に移行させる。この一連の操作を1サイクルとし、同様の動作を所定回数繰り返すことで、モード切り替えの円滑性および構成部品の耐久性を評価する。試験の結果、全サイクルにおいてモード切り替えがスムーズに行われたことが確認され、また、試験後にクラッチを分解・観察した結果、セレクタに破損や異常摩耗は認められず、クラッチとしての機能も維持されていることが確認できた。

## 5. 外部評価

社内評価に加えて、外部評価機関を活用したユニット評価も先行して実施している。これは、社内の評価結果に対する客観性と信頼性を高めるとともに、当該ユニットの対外的な信頼性を確保することを目的としたものである。特に、既存のPLSをOEM向けに量産開発し、ユニット評価の実績を有する外部評価機関を選定することで、新構造PLSの信頼性を先行的に確立し、将来的な拡販につなげるための有効なアプローチと位置付けている。



図14. Bertrandt 社 専用ベンチ外観

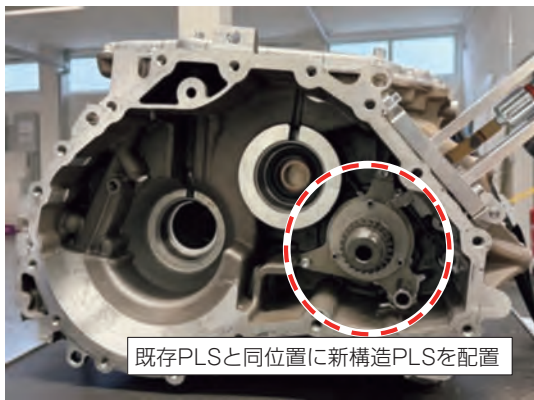


図15. 新構造 PLS 搭載位置

外部評価機関としては、Bayerische Motoren Werke AG (以下 BMW) をはじめとする欧州の自動車メーカーから高い信頼を得ている Bertrandt AG (以下 Bertrandt<sup>\*3</sup>) を選定した。同社による評価は、欧州市場における信頼性確保の観点からも極めて重要な意味を持つ。試験は、量産されている e-Axle を用いたユニット評価として実施し、既存の PLS との性能比較を通じて、新構造 PLS の優位性を実証するとともに、自動車メーカーの要求する耐久条件を満足することを確認することを目的としている。

試験は、実車条件を模擬した専用ベンチ (図14) 上に e-Axle (BMW 製) を搭載して実施した。新構造 PLS は、既存 PLS と同一位置に設置することで、両者を直接比較可能な条件を整えている。搭載状態の外観を図15に示す。

図16に専用ベンチの模式図を示す。本ベンチは、実車における車軸への負荷トルクと同等の条件を再現することを目的として設計されており、フライホイールの慣性モーメントおよびタイヤ側のブレーキ力を調整することで、車両挙動に対応した負荷条件を構築している。

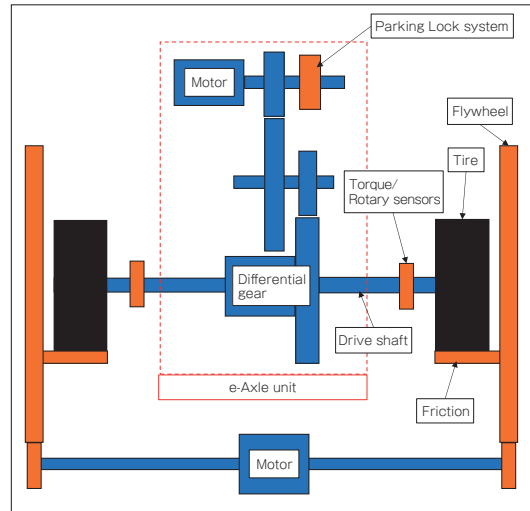


図16. Bertrandt 専用ベンチ模式図

表 2. 試験条件一覧

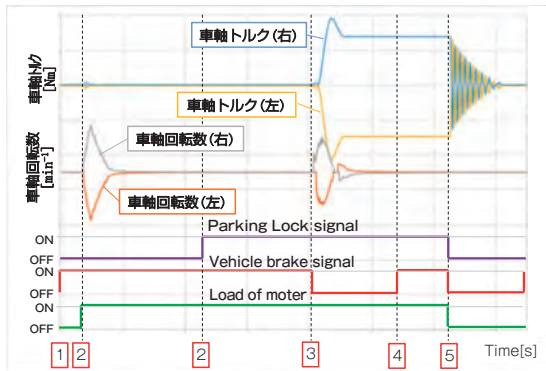
NO.	試験名	負荷条件 (PLC 軸)	回数 (前進 / 後退)	小計
1	ラチェット試験	500 min <sup>-1</sup>	10 / 10	20
2	32% 傾斜試験	400 Nm	250 / 250	500
3	12% 傾斜試験	150 Nm	12500 / 12500	25000
4	12% 傾斜 + 牽引試験	240 Nm	2250 / 2250	4500
5	ラチェット試験	500 min <sup>-1</sup>	10 / 10	20

まず、負荷用モータにより、勾配走行時に想定される加速度および負荷トルクを模擬し、その回転がフライホイールに伝達される。フライホイールとタイヤは、車両重量に基づく接地荷重を想定した摩擦力によって接触しており、これによりモータからの負荷がフライホイールおよびタイヤを経由してドライブシャフトに伝達され、実走行に近いトルク負荷を再現する構成となっている。

試験条件を表 2 に示す。本条件は、Bertrandt の経験に基づく耐久条件であり、市場における実車相当の負荷を想定した内容となっている。評価内容は大きく 2 種類に分類される。1 つは、傾斜路に駐車した状態を想定した「傾斜ロック・解除試験」、もう 1 つは、車両が完全に停止する前に PLS が作動することを想定した「ラチェット試験」である。

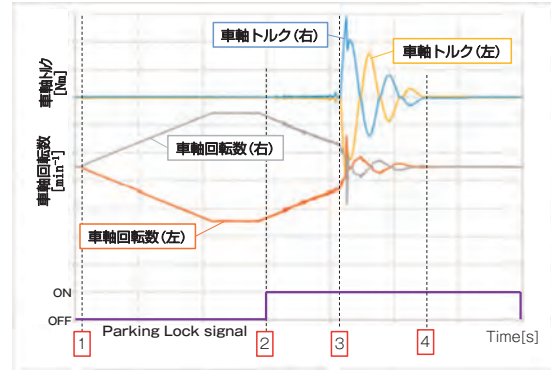
### 5.1 傾斜ロック・解除試験

本試験は、傾斜地に車両を駐車する状況を模擬した条件下で実施された。試験方法の概略を図17に示す。傾斜再現のため、フライホイールはアスファルトパッドを介してタイヤと連結され、パーキングロックはロック待機状態に設定された。次に、車軸にブレーキを適用した



Steps	説明
1	フットブレーキON
2	車輪にトルク負荷付与後、パーキングロックシステムON
3	フットブレーキOFF、パーキングロックシステムに負荷入力
4	静トルク保持後、フットブレーキシステム再ON
5	パーキングロックシステムを解除、車輪への負荷を除荷

図17. 傾斜ロック・解除試験 試験方法



Steps	説明
1	目標速度まで加速、目標速度で維持
2	パーキングロックシステムON
3	パワートレインをロックするまでベンチは作動
4	ロックすると、パワートレインはスイングアウト

図19. ラチェット試験 試験方法

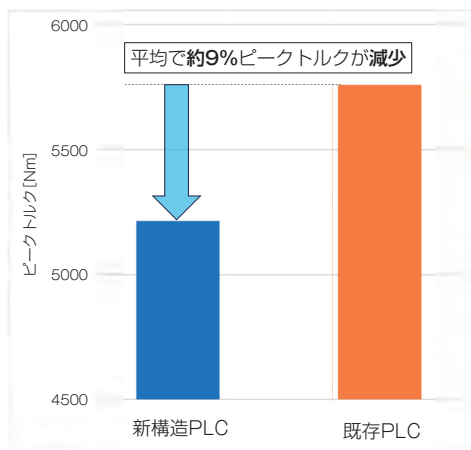


図18. 測定結果（ピークトルク）

上で、モータに所定の勾配条件を入力する。ブレーキを解除すると、勾配に相当する加速度でモータが駆動し、パーキングロックがドライブシャフトを機械的にロックする。その後、ドライブシャフトに負荷を加えたまま、パーキングロックをフリーモードへ戻す。本試験の特徴として、ブレーキ解除後にパーキングロックが作動する際、大きな衝撃トルクが発生する点が挙げられる。また、静止状態の維持には一定の保持トルクが継続して作用する。これらの条件下で30,000回の繰り返し試験を実施した結果、クラッチ機構に損傷は見られず、機能保持が確認された。図18には、32%傾斜試験のピークトルクの測定結果を示す。従来構造と比較し、新構造ではピークトルクを平均9%低減可能であり、これによりエンジンやモータ、関連システムへの負荷低減が期待される。

## 5.2 ラチェット試験

本試験は、走行中に PLS が誤作動する事態を想定して実施された。走行中に PLS が即座に作動してドライブシャフトを強制ロックすることは、安全性上極めて危険である。そのため、PLS には、車速が一定値を上回る場合はロックを回避し、一定値以下の時にのみロックが作動する機構が必要となる。

試験方法の概要を図19に示す。PLS をフリーモードに設定し、タイヤに目標車速相当の回転を30秒間入力する。その後、回転入力を停止し、PLS をロックモードに移行してラチェッティングを発生させる。回転数が減少する過程で、最終的に PLS がドライブシャフトを機械的にロックし、車両は完全停止する。

図20に前進走行時のラチェット試験を実施し、左右の駆動輪の回転数とトルクの結果を示す。結果より、新構造は従来構造に比べて、最大トルクを最大約50%低減でき、ロック後のバックラッシュも有意に抑制されていることが確認された。また、ラチェッティング中の回転数およびトルク信号のノイズも小さく、音振性能の面でも優れると評価された。試験後の新構造 PLC の観察結果を図21に示す。試験後も、クラッチ機構に損傷は見られず、機能保持が確認された。

Bertrandt の試験ベンチを用いた評価により、新構造 PLC は、Bertrandt の経験に基づく耐久条件を十分に満足することが確認された。本評価を通じて、新構造 PLC の特性上の優位性が明らかとなった。

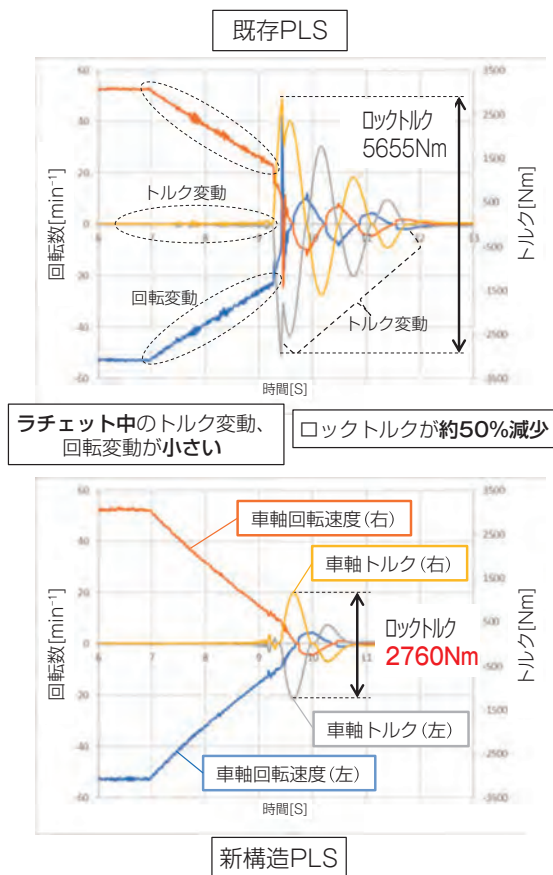


図20. ラチェット試験結果

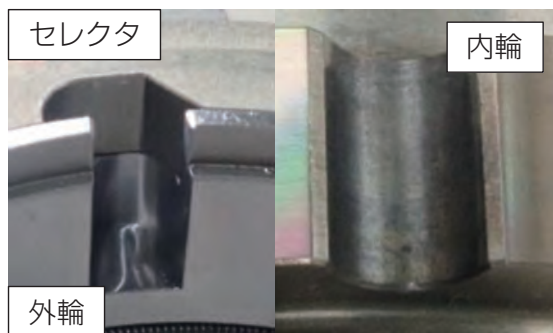


図21. 評価後観察結果

## 6. おわりに

地球温暖化の主要因であるCO<sub>2</sub>の排出削減は、自動車業界における重要課題である。特に、軽量化による低燃費化が強く求められている。これに対し、当社はPLSの小型化によるパワートレインユニットの軽量化を目的に、構成部品を小型化しつつ機能を維持する新構造PLCを開発した。

今後は、多様な車両レイアウトや市場ニーズに対応可能な構造を目指し、さらなる小型化を推進する。また、

モード切り替え時の推力低減により、アクチュエータの小型化を可能とするクラッチの開発を継続することで、パワートレインユニットの軽量化に貢献する。

### 参考文献

- 1) 国土交通省, 環境: 運輸部門における二酸化炭素排出量, [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html), 2025
- 2) 樽松勇二, セレクタブルクラッチ, 特開2024-167983, 2024-12-5
- 3) トヨタ自動車株式会社 - トヨタプリウス - 室内空間, <https://toyota.jp/prius/usability/>, 最終閲覧日: 2025年5月19日

### 用語解説

#### \*1 e-Axle

電動車の駆動システム。モータ・インバータ・ギヤ等を一体化したもの。

#### \*2 xEV

電気自動車 (BEV)、プラグインハイブリッド自動車 (PHEV)、ハイブリッド自動車 (HEV)、燃料電池自動車 (FCEV) を含む電動車の総称。

#### \*3 BERTRANDT

「BERTRANDT」は「Bertrandt AG」の登録商標。

# 拡散浸透処理を用いたMAX相の成膜メカニズム

Mechanism of MAX Phase Layer Formation Using Thermo-reactive Diffusion Process

藤崎 大地<sup>※1</sup>  
Daichi FUJISAKI

林 重成<sup>※2</sup>  
Shigenari HAYASHI

これまで報告のなかった、拡散浸透処理を用いたMAX相 ( $V_2AlC$ ) の成膜に成功するとともに、そのメカニズムを解明した。これは、あらかじめ適切な前駆体炭化物を形成することに加えて、Al の内方拡散量を制御することによって可能となった。今後はMAX相の性能確認や、異なる元素を有するMAX相の開発、製品への応用等へ向け、引き続き研究を行う。

We succeeded in the formation of the MAX phase layer ( $V_2AlC$ ) by using thermo-reactive diffusion process, which has not been reported before, and also clarified the mechanism of that formation. This was achieved by first forming a suitable precursor carbide and then by controlling the inward diffusion of Al. In the future, we will continue our research to confirm the performance of the MAX phase, to develop MAX phases with different elements, and to investigate their application to products.

## 1. はじめに

工業製品のしゅう動部では摩擦・摩耗が生じており、全世界の全エネルギー消費における摩擦・摩耗によるエネルギー損失は23%もあるという試算もあり<sup>1), 2)</sup>、今後さまざまな過酷摩耗環境へ適応できる新しいコーティングが必要である。耐摩耗性を目的としたコーティングの施工方法として物理蒸着 (Physical Vapor Deposition: PVD) 法や拡散浸透処理等があり、PVD法ではTiAlNやCrAlN等のAlを含むセラミックスコーティングが施工可能である。これらのコーティングは二元系セラミックスコーティングに比べて、耐摩耗性や耐酸化性が向上することが知られており<sup>3)-5)</sup>、さまざまな過酷摩耗環境に対しても高耐摩耗性が期待できる。当社ではこれまでに、拡散浸透処理を用いた表面改質技術を開発・適用しており、特にチェーンに対する耐摩耗性の向上を実現してきた。拡散浸透処理は安価なコーティング方法であるため工業的に広く使われており、特に粉末パッキ法は原料として粉末のみを使用し、PVD法に比べてシンプルな設備で大量生産が可能なコーティング技術であるが、これまでに拡散浸透処理法を用いたAl含有セラミックスコーティングは報告されていない。

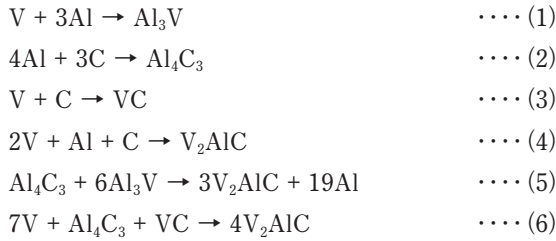
本研究では、PVD法においてAlを含むセラミックスコーティングが耐摩耗性・耐酸化性の向上に寄与している点に着目し、拡散浸透処理においてAlを含む新しいコーティングの開発を試みた。当社の先行研究において、VおよびAl拡散浸透処理による成膜メカニズムを明らかにしており<sup>6), 7)</sup>、これらの技術を駆使して拡散浸透処理によって、近年注目されているMAX相 ( $M_{n+1}AX_n$ ) の一種である  $V_2AlC$  を成膜することに成功した。今回対象としたMAX相とは、M (前期遷移金属)、A (Al等のAグループ金属)、X (炭素または窒素) から成り、MAの結合による金属の性質と、MXの結合によるセラミックスの性質を併せ持ち、A層とMX層が層状構造を有している。このようにMAX相は当初狙っていた耐摩耗性だけではなく、さまざまなユニークな特性を示すことから、幅広い分野で応用が期待されている材料である<sup>8)-13)</sup>。本研究は、MAX相の産業的応用に向けた有望な知見を提供するものであり、特に  $V_2AlC$  の成膜メカニズムに関する研究成果を報告する。

## 2. MAX相成膜についての課題と方針

三元系以上のセラミックス系化合物の生成は多数の反応経路が存在するため高温・高圧が必要であると言われている。ZadehらによるとV, Al, C粉末を出発材料として  $V_2AlC$  を形成させる場合、以下の反応が生じることが提案されている<sup>14)</sup>。

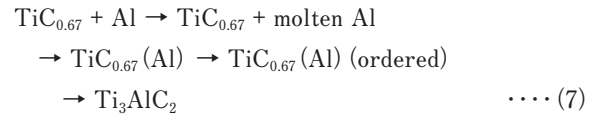
※1 DX・IT・研究開発センター 研究開発部

※2 北海道大学 大学院工学研究院 材料科学部門



これらの反応から、V-Al-C系での反応は、二元金属間化合物や二元炭化物が形成し、 $\text{V}_2\text{AlC}$ はこれらの二元炭化物と金属間化合物の反応によって形成されと考えられている。これらの反応は、例えば式(6)の反応の標準生成ギブスエネルギー変化（以下： $\Delta G$ ）は比較的小さいが、この反応にはVとVCが必要であり、式(3)よりVCの形成によりVが消費されると、式(6)の反応に寄与する系中のVの活量が低くなるため、 $\Delta G$ が大きくなり、反応が起こりづらくなる可能性がある。また、式(5)の反応は化合物の活量が全て1である場合、約1100℃で $\Delta G$ が負になることから、この反応による $\text{V}_2\text{AlC}$ の形成には最低でも1100℃以上の温度が必要となる。El-Raghyらによると、V、Al、C粉末を出発材料とした場合、高純度なMAX相を形成するためには熱間等圧加工法（HIP法）で1600℃、2~4 hの保持が必要であり、非常に高温・高圧条件が要求されることが報告されている<sup>15), 16)</sup>。

一方Rileyらは、TiとCがMAX相（ $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ ）と同じ化学量論比である構造を持った前駆体 $\text{TiC}_{0.67}$ 粉末とAl粉末を出発材料として、 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ を合成すると、従来よりも400~600℃も低い1000℃程度で高純度のMAX相が形成可能であることを報告している<sup>17)</sup>。彼らは室温から1000℃まで中性子粉末回折装置を使いリアルタイムで反応を観察することで、式(7)の反応が起こることを報告している。



Rileyらは $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ では、AlがCの積層欠陥中に偏析し、それらが秩序化することで $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ が形成することを報告している。さらに、彼らはC欠陥を秩序化すると、MAX相の生成がより容易になることを提案している。同様に $\text{V}_2\text{AlC}$ についても $\text{V}_2\text{C}$ とAl粉末を出発材料とすることで1000℃程度でも高純度の $\text{V}_2\text{AlC}$ が形成することがLiuらによって報告されている<sup>18)</sup>。

これらの報告より、目的の多元系炭化物に対して適切な前駆体を形成できれば、一般的に大気圧・1000℃以下で処理を行う拡散浸透処理でもMAX相の成膜が期待できる。

### 3. 実験方法

円筒形アルミナるつぼ中のパック粉末に試料を埋没した。それを図1に示す実験炉に投入し、ロータリーポンプで炉内を真空引きし、その後Arガスで大気圧まで復圧した。その後、試料はArフロー中で昇温した。昇温後にV拡散浸透処理（以下、V拡散）を行い、炉冷した。さらに、V拡散後の試料を流水およびアセトンにて洗浄した後、Al拡散処理（以下、Al拡散）を行った。各試験条件を表1に示す。なお、Al拡散のAr流量、昇温冷却時間はV拡散と同様で行った。試料はFe-1.2C (in wt.%) 鋼（以下 (in wt.%) 省略）を用いた。この合金は他の元素の影響をなくすために純鉄(Fe)および黒鉛粉末(C)を出発原料としてAr-アーク溶解法で作製した。これらのインゴットから試料を切り出し、研磨した試料を実験に供した。処理粉末は焼結防止剤として $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、活性剤として $\text{NH}_4\text{Cl}$ に加え、V拡散処理ではフェロバナジウム粉末、Al拡散処理ではフェロアルミニウム粉末を使用した。

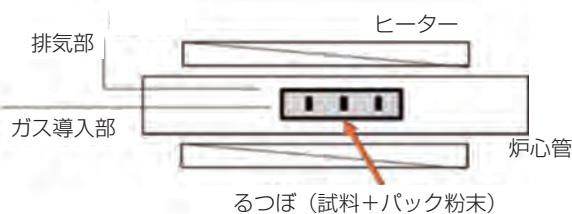


図1. 熱処理炉の概要

表1. 各試験条件

No.	V 拡散処理		Al 拡散処理	
	温度(℃)	保持時間(h)	温度(℃)	保持時間(h)
1	980	5	980	5
2	980	5	900	1
3	980	25	900	1

## 4. 実験結果

図2にV拡散を980°Cで5h行った試料の断面組織を示す。V拡散後の組織は表面から $V_2C$ 、 $VC_x$ がそれぞれ約2.5 $\mu m$ 、約16 $\mu m$ 形成し、 $V_2C$ と $VC_x$ 界面および $VC_x$ 中には $\sigma$ -FeVが析出した。図3にV拡散後Al拡散を980°Cで5h行った試料の断面組織を示す。表面からコントラストの明るい層、コントラストの異なる波型の相を含む層、コントラストのやや暗い層、明るいコントラストの母材中にやや暗いコントラストの析出物が形成した層が観察された。なお、Al拡散後には、図3(b)のようにコーティング層が剥離している箇所も見られた。図4のEPMA (Electron Probe Micro Analyzer)

の分析結果から、コーティングは表面から $\beta$ -FeAl、 $VC_x + \beta$ -FeAl、 $Fe_3AlC$ 、 $Fe_3AlC + \alpha$ -Fe(Al)層が同定できた。なお、本報では割愛するが、これら各相はXRD (X-Ray Diffraction) でも確認している。また、第2層目の層中の波型の相については、FeとAlがほぼ同じ濃度であることから、 $\beta$ -FeAlであると考えられる。この結果から拡散処理によるAlの供給量が多すぎた可能性があることから、拡散処理中のAlフラックスを抑えるために、Al拡散時の温度と保持時間を減らした条件を検討した。

図5にV拡散を980°Cで5h、次いでAl拡散を900°Cで1h行った試料の断面組織とEPMA分析結果(図6)を示す。母材と層との界面には空隙が観察された。図6

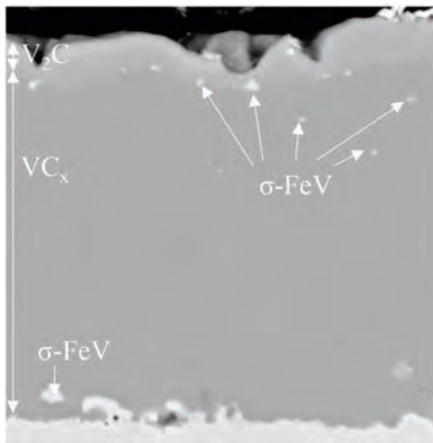


図2. V拡散処理980°C / 5 h の断面組織

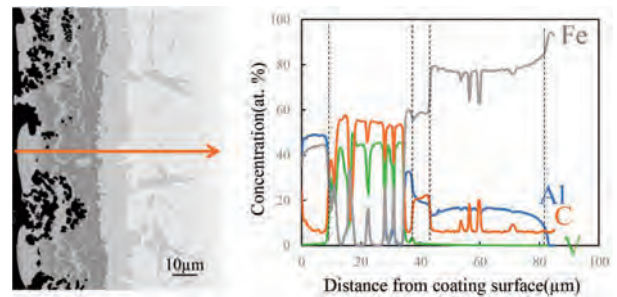


図4. 図3 (a) の EPMA 分析結果

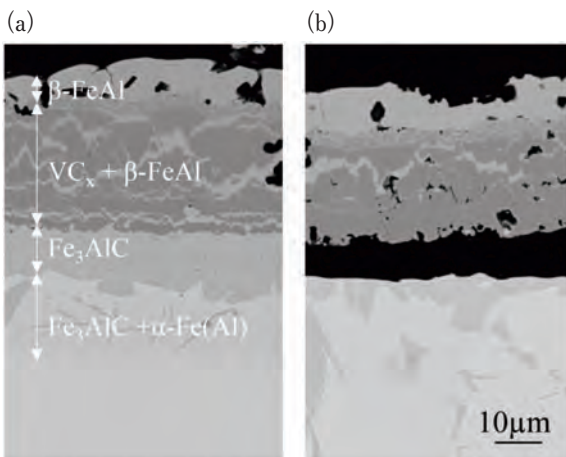


図3. V拡散処理980°C / 5 h 後、Al拡散処理980°C / 5 h の断面組織

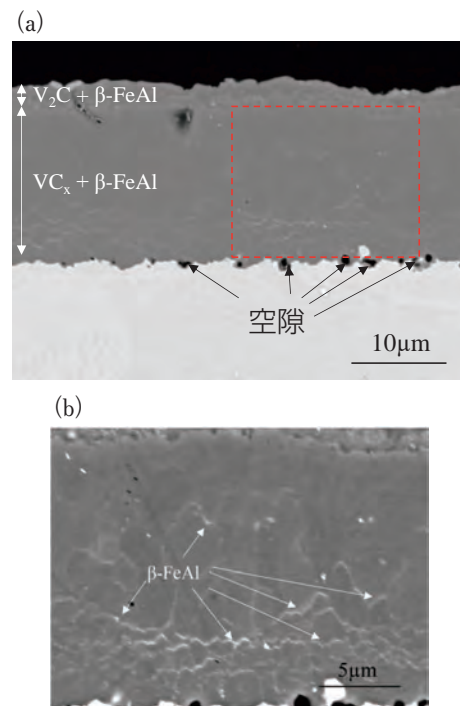


図5. (a) V拡散処理980°C / 5 h 後、Al拡散処理900°C / 1 h の断面組織  
(b) (a) 赤枠部の拡大組織写真

に示す EPMA および本報では割愛した XRD 分析から、コーティングは表面から  $V_2AlC + \beta\text{-FeAl}$ 、 $VC_x + \beta\text{-FeAl}$  と同定され、 $VC_x$  中の  $\beta\text{-FeAl}$  は母材側でより多く見られた。

$V_2C$  中の Al の拡散を確認するため、層厚を厚くした  $V_2C$  を作製し、その試料を Al 拡散した。図 7 (a) に、1 段階目の V 拡散を保持温度  $980^\circ\text{C}$ 、保持時間 25 h で行った試料、図 7 (b) にさらにそれに Al 拡散を保持温度  $900^\circ\text{C}$ 、保持時間 1 h で行った試料の断面組織を示す。25 h の V 拡散処理により、 $V_2C$  および  $VC_x$  層は厚く成長し、その後の Al 拡散処理により、最表面にはコント

ラストの暗い連続層が形成した。これらの処理後には母材との界面に剥離や空隙は観察されなかった。図 8 に示す EPMA の分析結果から、最表面のコントラストの暗い層は主に V と Al と C から構成されており、内側への Al の拡散は確認されず、表面には  $V_2AlC$  層が形成したことが確認された。

図 7 (a) の  $V_2C$  の領域および図 7 (b) の  $V_2AlC$  領域を TEM (Transmission Electron Microscope) による電子線回折と高分解像を図 9, 10 に示す。電子線回折の結果からそれぞれの層は  $V_2C$  および  $V_2AlC$  であることが同定された。 $V_2C$  には図 9 の矢印に示すように、スポッ

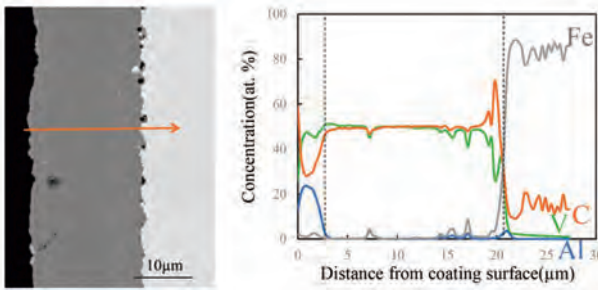


図6. 図 5 試料の EPMA 分析結果

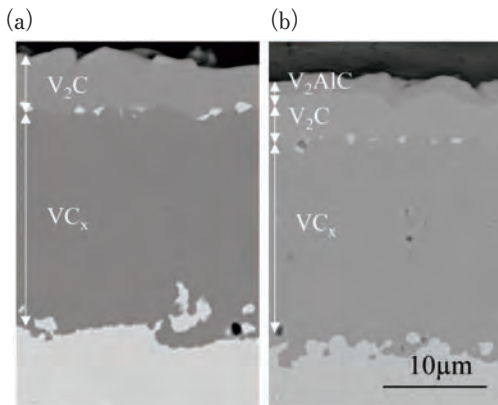


図7. (a) V 拡散処理  $980^\circ\text{C}$  / 25 h、  
(b) (a) 試料を Al 拡散処理  $980^\circ\text{C}$  / 1 h の断面組織

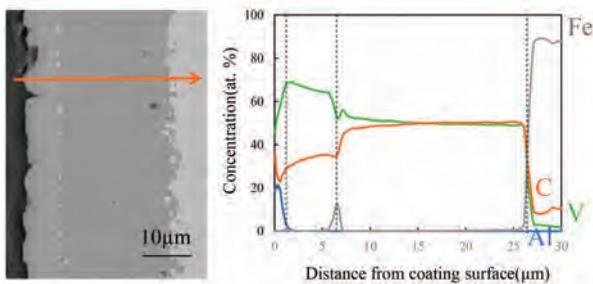


図8. 図7(b) 試料の EPMA 分析結果

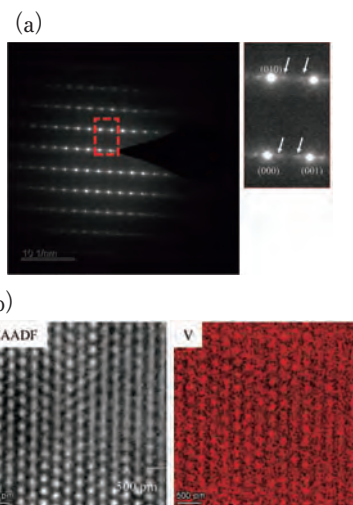


図9.  $V_2C$  の (a) 電子回折像と (b) 高分解像

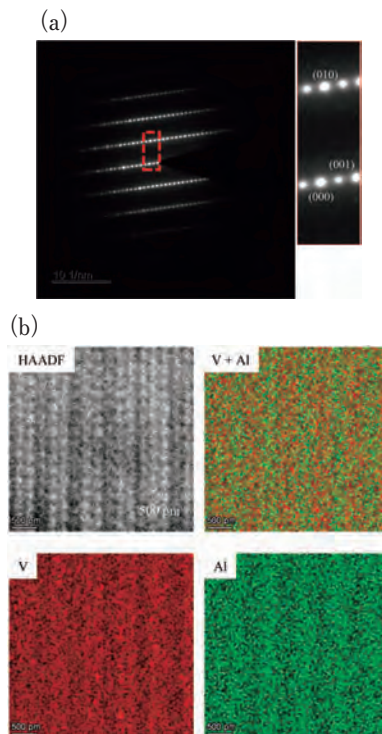


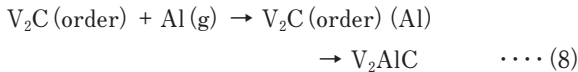
図10.  $V_2AlC$  の (a) 電子回折像と (b) 高分解像

ト間に薄いスポットが見られた。図10の高分解像からは、 $V_2AlC$ のVとAlがMAX相であることを示す構造で、層状に規則的に並んでいることが観察された。

## 5. 考察

### 5.1 粉末パック法における $V_2AlC$ の成膜メカニズム

$V_2C$  および  $V_2AlC$  の結晶構造を図11に示す<sup>19)-21)</sup>。 $V_2C$ はVとCが $V_2AlC$ と同じ量論比(図11(a))であることに加え、MXのC欠陥を秩序化した積層欠陥とすれば、これはMAX相形成のための適切な前駆体(図11(b))になり得ることが分かる。図9で見られた周期的な薄いスポットは秩序化した積層欠陥による超格子反射と考えられ、さらに図9の高分解像より生成した $V_2C$ のV格子に明確な欠陥は認められないことから、超格子反射はVの欠陥ではなくCの欠陥を示していると考えられる。Al粉末パック法ではAlCl<sub>3</sub>ガスが表面で解離しAlが形成し表面から拡散する<sup>7)</sup>。 $V_2C$ 中にはAlはほとんど固溶しないが、Alは積層欠陥中に配置されると考えると式(7)と同様に、式(8)で示される反応が生じることが予想される。



これにより $V_2AlC$ が形成したことが考えられる。また、MAX相中のMX層とA層の結合は弱く、A元素の拡散は容易であることが報告されていることから<sup>22), 23)</sup>、 $V_2AlC$ 中のAlが内方に拡散することで $V_2AlC$ が内方成長したと考えられる。

### 5.2 $V_2C$ 領域以外で $V_2AlC$ が形成しない原因

$VC_x$ までAlが拡散すると $V_2AlC$ は形成せず、 $VC_x$ 中の $\beta$ -FeAlが増加した。AhmedらはTi系のMAX相について $TiC_x$ 中のxの割合を0.4~1.0まで変化させて、1000℃でAlと反応させたところ、 $Ti_2AlC$ あるいは $Ti_3AlC_2$ のTi/C比から大きく異なる $TiC_x$ ではMAX相は形成しなかったことを報告している<sup>24)</sup>。 $VC_x$ でも同様にV/C比が $V_2C$ と大きく異なっている場合には $V_2AlC$ は形成しないと考えられる。

$VC_x$ 中で $\beta$ -FeAlが増加した理由について、V拡散処理後の $V_2C$ および $VC_x$ 中には微量のFeが固溶しており、その濃度は母材側で高いことが明らかとなっている。図6に示すように $VC_x$ までAlが拡散した際に形成した金属相( $\beta$ -FeAl)は母材側により多く見られたことから、固溶したFeが多い母材側から $VC_x$ 中に $\beta$ -FeAlが形成したと考えられる。一度 $\beta$ -FeAlが形成すると、 $\beta$ -FeAlを介したAlの内方拡散とFeの外方拡散が顕著となり、 $VC_x$ 中の金属間化合物相が急激に増加したと考えられる。

## 6. おわりに

当社が保有する拡散浸透処理を用いた表面改質技術を応用することによって、MAX相のひとつである $V_2AlC$ の成膜に成功した。MAX相を拡散浸透処理において成膜するには適切な前駆体が必要であり、本研究でその成膜メカニズムを提案した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

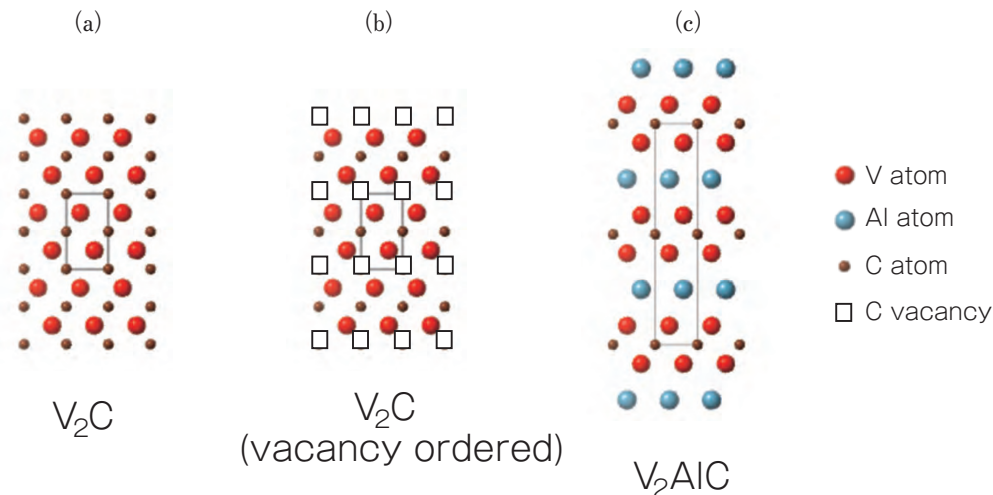


図11. (a) $V_2C$ , (b) $V_2C$ の積層欠陥, (c) $V_2AlC$ の結晶構造<sup>19)-21)</sup>

- ・ V 拡散処理時間を長くし、厚い V<sub>2</sub>C 層を成膜させた後、Al 拡散処理を低温で行うことで均一な V<sub>2</sub>AlC 膜を成膜することに成功した。
- ・ V 拡散処理後に Al 拡散処理を行う際に、Al が VC<sub>x</sub> まで到達すると、VC<sub>x</sub> 中に金属相が形成するとともに、Al および Fe の拡散が顕著に増加し、コーティング膜は鋼上から剥離した。
- ・ VC<sub>x</sub> まで Al が拡散すると、VC<sub>x</sub> 中の Fe 濃度が高い母材側から β-FeAl が形成し、β-FeAl を介しての Al の内方拡散と Fe の外方拡散が顕著になったため、コーティングが維持できなくなったと考えられる。

## 7. 謝辞

本研究プロジェクトは、北海道大学との共同研究の環境として実施したものであり、本稿で掲載したデータ等は著者の学位論文から抜粋となる。調査・分析をはじめ、多大なるご指導とご協力を賜った関係者の皆様に、心より深く感謝申し上げます。特に、北海道大学の関係者の皆様におかれましては、専門的な知見に基づいた的確なご助言とご支援を賜り、本研究の遂行にあたり多大なるお力添えをいただいたことを、ここに改めて厚く御礼申し上げます。また、社内においても、多方面にわたりご尽力・ご協力いただいた関係者の皆様に対し、心より感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) CRDS 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター, 環境・エネルギー分野トライボロジー, 2021.
- 2) K. Holmberg, and A. Erdemir, *Friction* 5, 3, 2017, 263.
- 3) 大原久典, 電気学会誌, 119, 12, 1999, 752.
- 4) 川名淳雄, 表面技術, 58, 8, 2007, 440.
- 5) 金原繁, 表面技術, 58, 12, 2007, 705.
- 6) 藤崎大地, 林重成, 鉄と鋼, 109, 10, 2023, 802.
- 7) 藤崎大地, 林重成, 米田鈴枝, 鉄と鋼, 110, 8, 2024, 610.
- 8) G. Surucu, *Materials Chemistry and Physics*, 203, 2018, 106.
- 9) T. Galvin, N. C. Hyatt, W. M. Reaney, and D. Shepherd, *Nuclear Materials and Energy*, 22, 2020, 100725.
- 10) M. A. Hadi, N. Kelaidis, S. H. Naqib, A. Chroneos, and A. K. M. A. Islam, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 129, 2019, 162.
- 11) S. N. Perevisolv, T. V. Sokolova, and V. L. Stolyarova, *Materials Chemistry and Physics*, 267, 2021, 124625.
- 12) C. Lange, M. W. Barsoum, and P. Schaaf, *Applied Surface Science*, 254, 2007, 1232.
- 13) S. Wang, J. Ma, S. Zhu, J. Cheng, Z. Qiao, J. Yang, and W. Liu, *Materials and Design*, 67, 2015, 188.
- 14) M. H. Zadeh, E. Ghasali, O. Mirzaee, H. M. Semnani, M. Alizadeh, Y. Orooji, and T. Ebadzadeh, *Journal of Alloys and Compounds*, 795, 2019, 291.
- 15) T. El-Raghy, M. W. Barsoum, *Journal of The American Ceramics Society*, 82, 1999, 2849.
- 16) T. El-Raghy, M. W. Barsoum, A. Zavaliangos, and S. R. Kalidindi, *Journal of the American Ceramics Society*, 82, 1999, 2855.
- 17) D. P. Riley, and E. H. Kisi, *Journal of the American Ceramics Society*, 90, 2007, 2231.
- 18) R. J. Liu, L. X. Yang, Y. Wang, H. J. Liu, S. L. Zhu, and C. L. Zeng, *Ceramics International*, 47, 2021, 16086.
- 19) Y. Seto, and M. Ohtsuka, *Journal of Applied Crystallography*, 55, 2022, 397.
- 20) J.C. Schuster, H. Nowotny, and C. Vaccaro, *Journal of Solid State Chemistry*, 32, 1980, 213.
- 21) B. Lönnberg, *Journal of the Less Common Metals*, 120, 1986, 135.
- 22) L. Xiao, S. Li, G. Song, and W. G. Sloof, *Journal of the European Ceramic Society*, 31, 2011, 1497.
- 23) G. Xing, C. Deng, J. Di, J. Ding, H. Zhu, and C. Yu, *Ceramics International*, 48, 2022, 14424.
- 24) A. Abdulkadhim, T. Takahashi, D. Music, F. Munnik, and J. M. Schneider, *Acta Materialia*, 59, 2011, 6168.

# サロゲートモデル構築技術の開発と チェーン形状最適化への適用検証

Development of Surrogate Modeling Technology and Verification of its Application to Chain Shape Optimization

森村 武史<sup>\*1</sup>

Takeshi MORIMURA

近年 CAE<sup>\*1</sup> の分野では、機械学習の技術を応用し高速な予測を実現する、いわゆるサロゲートモデル<sup>\*2</sup> の活用が進んでいる。当社でもこの技術を用い、各種製品の開発期間短縮を実現したい。本報では、当社の過去の解析事例であるチェーンの最適形状探索を題材とし、当時の解析データを用いてサロゲートモデルを構築、さらにそのモデルを用い最適形状探索を行った。サロゲートモデルにより得られた最適形状は過去事例で得られた最適形状と同等の性能を有し、かつ計算時間を約84%削減できるという結果となった。

In the field of CAE<sup>\*1</sup>, there has recently been increasing utilization of so-called surrogate models<sup>\*2</sup>, in which machine learning technology is applied to realize high-speed prediction. Our company also hopes to use this technology to shorten the development lead time for various products. In this report, we used the theme of a previous example of analysis our company performed to investigate chain shape optimization and used the analysis data from that time to build a surrogate model. We then used that model to perform a search for the optimal shape. The optimal shape obtained from the surrogate model had equivalent performance to the optimal shape obtained in the past analysis, and also it was possible to reduce the computation time by about 84%.

## 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<sup>1)</sup>や、最適化手法との組み合わせに關しての紹介<sup>2)</sup>をしており、CAEの活用は広まっている。

本誌前報<sup>3)</sup>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。さらにスーパーコンピュータシステム「富岳<sup>\*3</sup>」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。

今後 CAE の活用がより進めば、最適化計算等により膨大な数の解析データが蓄積されていくことになる。将来的には、この蓄積された解析データを活用してサロゲートモデルを構築し、従来の FEM<sup>\*4</sup> 解析より予測を高速化することを目指している。これにより、より短時間で最適解を探索できるようになり、開発期間の短縮が実現可能となる (図1)。一方で、サロゲートモデルの具体

的な活用検討は当社内で進んでいないのが現状である。

そこで、本報では、過去に CAE を用いて実施したチェーンの最適形状の探索の事例を題材に、その解析データを用いてサロゲートモデルを構築することで、その予測精度を確認した。また、サロゲートモデルを用いて最適形状の探索を行い、その計算時間や得られた最適形状を評価した。これらの結果をもとに、サロゲートモデルにより想定される効果や構築時の注意点、活用すべき場面を考察した。

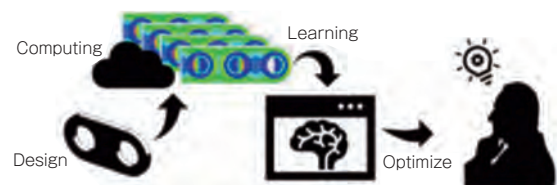


図1. CAE 評価におけるありたい姿

## 2. 方法

### 2.1 題材とする過去の解析事例

今回題材とした過去の解析事例は、チェーンの質量を可能な限り抑えつつ、その強度を最大化できる形状を得

\*1 DX・IT・研究開発センター DX 技術開発部

ることを目的としている。解析には、形状の寸法に関する9つの設計変数を用いた。

解析モデルの概略を図2に示す。チェーン形状の対称性を利用した1/4モデルを用い、端部に引っ張り荷重を与えている。

この構築した解析モデルを用いて、最適形状の探索を行っている。初期サンプルとして、ラテン超方格法<sup>\*5</sup>で得られた180条件の解析を行い、それをもとに遺伝的アルゴリズム<sup>\*6</sup>による最適形状の探索を1440条件実施している。評価指標として、①モデル全体の質量（小さいほど良好）と、②引張荷重に対する最大主応力（小さいほど良好）の2つを用い、②の値を特に優先している。このとき得られたパレート解を図3に示す。

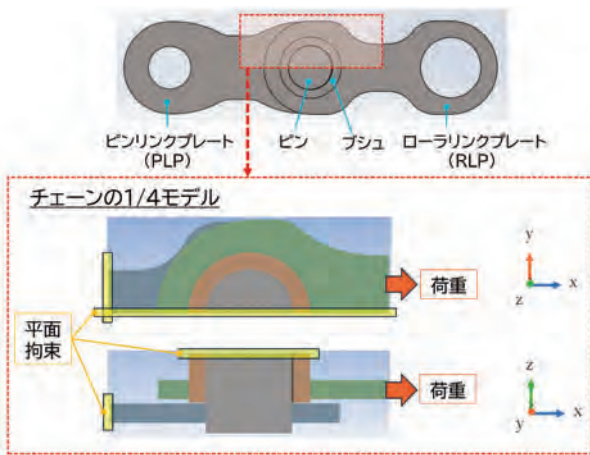


図2. 解析モデルの概略

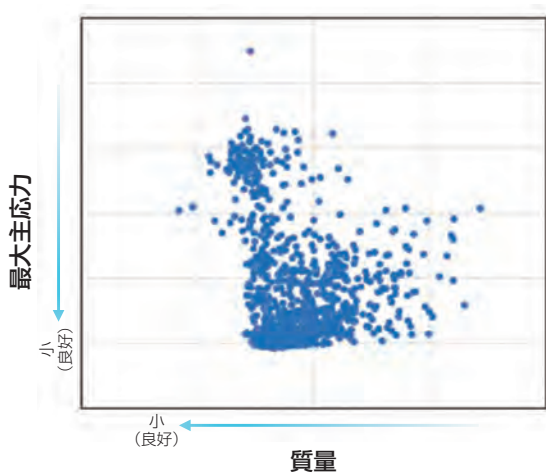


図3. 過去事例で得られたパレート解

## 2.2 本報での実施内容

本報では、過去実施内容の代替として、初期サンプル180条件でサロゲートモデルを構築し、そのモデルを用いて最適形状を探索するという業務フローを想定する

(図4)。まず、サロゲートモデルを実際に構築し、その予測精度が十分であるか検証する。その後、過去実施時と同様に遺伝的アルゴリズムを用いて最適形状の探索を行う。最終的に得られた最適形状が過去事例で得られたものと同等の性能を示すか、また、計算時間がどの程度削減できたかを評価する。

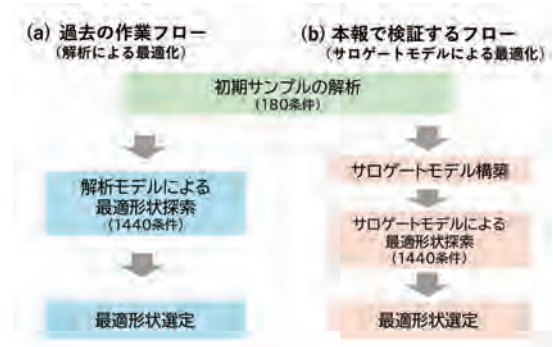


図4. 作業フローの比較

## 3. サロゲートモデルの性能評価

### 3.1 モデル構築と評価方法

初期サンプル180条件を用いてサロゲートモデルを構築し、その予測精度を評価する。過去実施内容に倣い、設計変数9つを説明変数として、最大主応力と質量を予測する。サロゲートモデルは予測対象ごとに構築する。

評価には、最適形状探索のデータ1440条件に対する予測値と真値の決定係数<sup>\*7</sup>を用いる。決定係数は式(1)を用いて算出している。

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad \dots (1)$$

ここで、 $R^2$ が決定係数、 $SS_{tot}$ が全変動平方和、 $SS_{res}$ が残差平方和である。 $SS_{tot}$ と $SS_{res}$ は、それぞれ式(2)、式(3)で求められる。

$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad \dots (2)$$

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \dots (3)$$

ここで、 $y_i$ が真値、 $\bar{y}$ が真値の平均値、 $\hat{y}_i$ が予測値である。

また、定性的な評価として、評価用データに対する予測値と真値の散布図も確認する。予測精度が良好であれば、各点は $y=x$ の直線に沿うような形でプロットされるはずである。

### 3.2 勾配ブースティング決定木\*(GBDT)による予測

まず、機械学習手法にGBDTを用いサロゲートモデルを構築した。一般的にGBDTは深層学習\*9)に比べ、学習・推論時間が高速であるという利点がある。

説明変数には9つの設計変数をそのまま使い、質量と最大主応力を予測するモデルをそれぞれ作成した。図5に真値と予測値の散布図と決定係数を示す。

質量の決定係数は0.613と比較的高く、散布図からも予測精度が良好であることが確認できた。それに対し最大主応力は決定係数が0.133と低く、散布図からも予測精度が十分でないことを確認できた。以降は最大主応力の予測精度の改善を試みた。

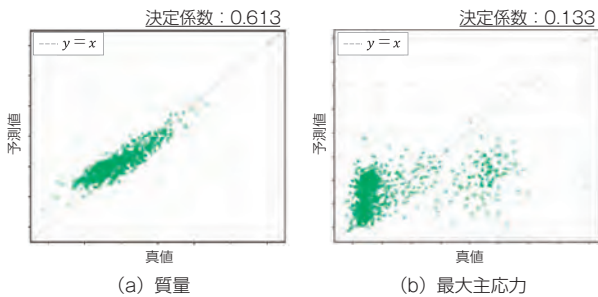


図5. 質量と最大主応力の予測結果 (GBDT)

### 3.3 データ拡張手法の適用と深層学習による予測

最大主応力の予測精度が低い要因として、学習データが少ないことが強く影響していると考えた。その対策として、参考文献4)で提案されたデータ拡張手法(学習データの説明変数に微小なノイズを与え、仮想的にデータセット数を増加する)を適用した。これにより学習データの数は166から2506に増加した。

また、モデルの表現力を補強するため、9つの設計変数の2乗した値(例:設計変数 $x_1$ の2乗)と、2つの組み合わせの積(例:設計変数 $x_1$ と設計変数 $x_2$ の積)を説明変数に追加した。これにより、説明変数の数は9から54に増加した。さらに、特徴間の相互作用の表現力を高めるために、機械学習モデルを深層学習に変更した。

図6に最大主応力の真値と予測値の散布図と決定係数を示す。決定係数は0.012と低く、散布図からも予測精度が悪いことが確認できる。図5で示した結果と比較しても改善していないことが分かる。

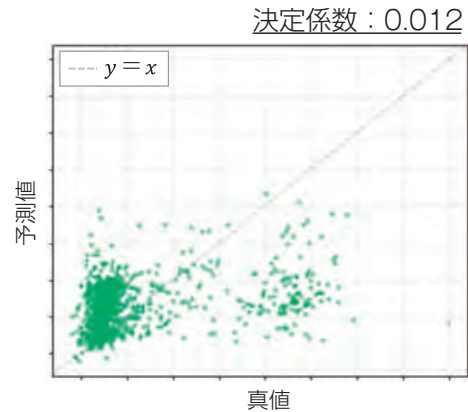


図6. 最大主応力の予測結果 (データ拡張)

### 3.4 最大主応力の領域ごとの予測

最大主応力の予測精度が悪い要因として、最大主応力が発生する部位が形状によって異なり、機械学習モデルがうまくパターンを学習できなかったと考察した。その対策として、図7の3つの領域(PLPとRLPで計6領域)ごとに最大主応力を算出し、それを予測する機械学習モデルを作成した。最終的に得られた6つの最大主応力のうち、最大のものをモデル全体の最大主応力とし、その予測精度を確認した。

図8に真値と予測値の散布図と決定係数を示す。決定係数は0.093であり、依然として低い値を示した。この要因として、図8から分かる通り、くびれ部の予測精度が特に悪いことが影響していることが確認できた。



図7. 最大主応力を予測する3つの領域

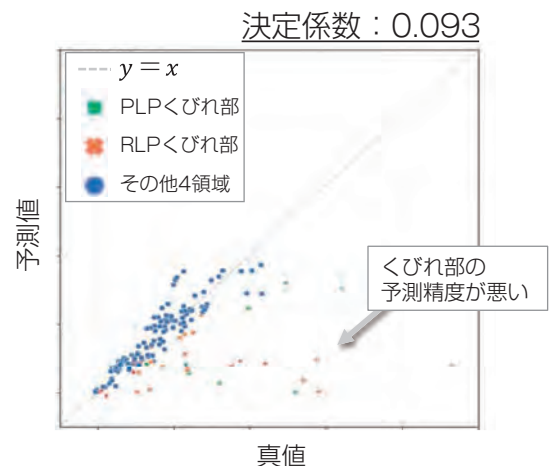


図8. 最大主応力の予測結果 (領域ごとの予測)

### 3.5 くびれ部の特徴を用いた予測

くびれ部の予測精度が悪い要因として、くびれ部の形状の特徴を今の説明変数ではとらえられていないと考察した。予測精度が悪かったデータを確認すると、くびれ部の曲率が特に大きいという特徴を有しており、この部分に最大主応力が発生していたことが分かった。

そのため、くびれ部の形状を特徴抽出して、それを機械学習モデルに与えることで、予測精度が改善すると考えた。特徴抽出によりくびれ部の形状に関する3つの説明変数を加え、くびれ部で発生する最大主応力の予測精度が改善するか確認した。

図9にPLPくびれ部の、図10にRLPくびれ部の真値と予測値の散布図と決定係数を示す。各図には修正前のグラフも載せている。決定係数は大幅に改善し、散布図からもくびれ部の予測が十分にできていることが確認できた。よって、くびれ部の最大主応力の予測にのみ、上記の説明変数の追加を採用することとした。

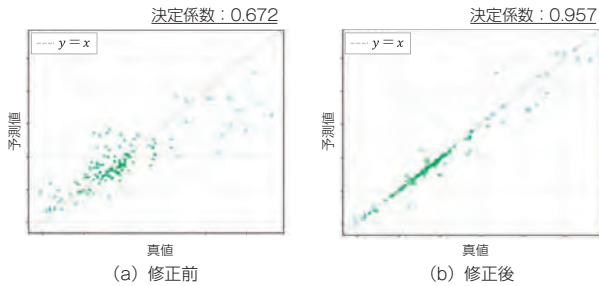


図9. 最大主応力の予測結果 (PLP くびれ部)

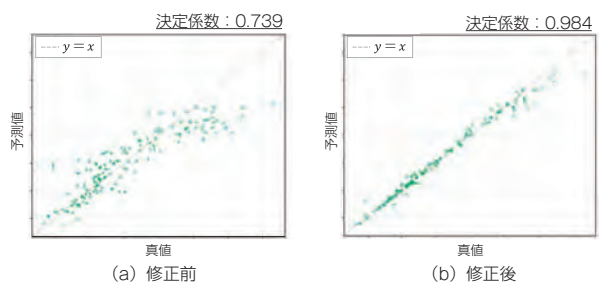


図10. 最大主応力の予測結果 (RLP くびれ部)

### 3.6 サロゲートモデル構築まとめ

以上4つの検証から、質量の予測と最大主応力の予測は最終的に表1の形で実施することとした。その予測精度を図11に示す。結果的に、質量と最大主応力ともに解析で得られた傾向を十分再現するような機械学習モデルが得られた。

表1. 最終的なサロゲートモデルの予測手順

	予測対象	
	質量	最大主応力
機械学習モデル	GBDT	深層学習
データ拡張の適用	無し	あり (2506条件の拡張)
特徴抽出	無し	くびれ部の予測のみあり
後処理	無し	6領域に対する予測を行い、その最大値を形状全体の最大主応力として採用

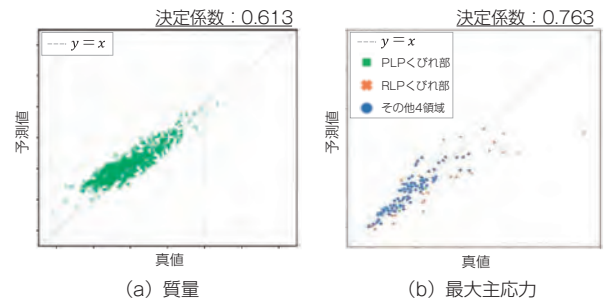


図11. 最終的なサロゲートモデル予測結果

## 4. チェーン最適形状の探索

### 4.1 チェーン最適形状の探索結果

作成したサロゲートモデルと最適化手法を組み合わせることにより、チェーンの最適形状の探索を行った。手法は遺伝的アルゴリズムを用い、質量と最大主応力をどちらも最小化する多目的最適化を試みた。得られた最適形状を、過去事例で得られた最適形状と比較し、その性能を比較した。探索数は過去の検証と同様1440条件に設定した。

最適形状探索で得られた解の散布図を図12に示す。比較対象として過去実施分の結果も示している。両者を比較すると、分布の様子は多少異なるが、質量と最大主応力のパレート解<sup>\*10</sup>は類似する領域 (図のグレー点線の領域) に展開されていることを確認した。

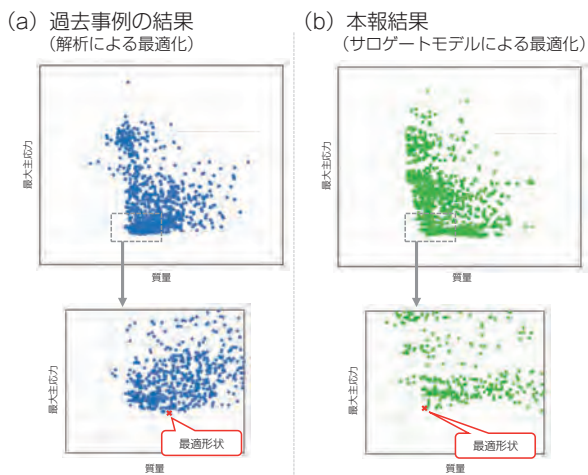


図12. 最適形状探索で得られた解の分布

#### 4.2 チェーン最適形状の評価

最大主応力が小さくなることを優先し、図12に赤色で示した条件を最適形状として選定した。それぞれで得られた最適形状は類似する特徴を有するものであった。サロゲートモデルで得られた最適形状における最大主応力と質量について、過去事例で得られた最適形状と比較したものを表2に示す。この表では、サロゲートモデルで得られた最適形状の各評価指標予測値と、その最適形状で解析を実施して得られた値をいずれも記載している。後者の結果に着目すると、サロゲートモデルによる最適形状探索で得られた形状は、過去事例に比べ最大主応力で1.2%、質量で-1.0%の乖離であった。乖離が十分に小さいことから、サロゲートモデルで得られた最適形状は、過去事例の最適形状と同等の性能を有すると判断する。

表2. サロゲートモデル最適形状の性能確認結果

	過去事例の最適形状に対する比	
	サロゲートモデル 予測値	解析結果
最大主応力	0.2%	1.2%
質量	-1.5%	-1.0%

#### 4.3 計算時間の評価

初期サンプルの解析時間とモデル構築・最適形状探索に要した計算時間をまとめたものを、表3に示す。解析（過去実施分）とサロゲートモデルにおいて、後者はサロゲートモデルの学習に時間を要するが、その後の最適形状探索で大幅に計算時間を短縮できている。全体と比較すると、サロゲートモデルの活用により、計算時間を約84%削減できるという結果になった。

表3. 計算に要した時間の比較

	計算時間 (h)	
	解析による最適化 (過去実施分)	サロゲートモデルによる最適化 (本報)
初期サンプル解析 (180条件)	6	6
サロゲートモデル構築	—	6
最適形状探索 (1440条件)	72	0.13
計	78	12.13

## 5. おわりに

### 5.1 サロゲートモデル検証結果

本報では、サロゲートモデルの活用に向け、過去に実施したチェーン形状最適化事例の解析データを学習データとしサロゲートモデルを構築した。また、そのモデルを用いて最適形状を探索し、過去事例で得られた最適形状と比較した。

構築したサロゲートモデルの予測精度は、その傾向を十分とらえており、実運用可能なレベルであると判断した。サロゲートモデル構築の一連の検証を振り返ると、本件においては、単にデータ拡張手法を適用したり、機械学習モデルを変更したりするだけでは予測精度が上がりなかった。ただ、これらにドメイン知識に基づいた考察と対策を組み合わせることで、予測精度が改善した。機械学習モデルの予測精度改善には、一般的な予測精度改善手法に加え、そのデータセット特有のドメイン知識に基づく改善を加えることが重要であることが示唆される結果となった。

また、サロゲートモデルにより得られた最適形状は、過去事例で得られたものとは比べ遜色ないものであった。最適形状探索に要した時間は過去事例に比べ約84%削減でき、サロゲートモデルの計算時間における優位性を確認できた。

サロゲートモデルにおける一般的な注意点として、学習データの範囲外の予測が行えないというものがあげられる。サロゲートモデルにより最適形状探索を行う場合は、その探索範囲を明確にし、学習データを用意する必要がある。

また、表3に示したように、最終的なサロゲートモデルの構築に要した計算時間は6時間程度であったが、モデリングの試行錯誤の過程で20時間以上を要している。単発の設計業務のような場合では、サロゲートモデル構築の工数が大きくなることや、十分な予測精度が得られない等の懸念があることから、従来通り解析モデルを用いた最適化のほうが有利であることも起こりうる。

対象とする業務の重要性や頻度を明確にして、適切な方法を選択すべきであると考え。

## 5.2 今後の展望

今後は、サロゲートモデルを社内の設計業務に活用することを検討する。5.1節で言及した視点からサロゲートモデル構築の効果が大きそうな課題を選定し、優先順位を整理して取り組んでいく。

併せて、解析データを適切に収集・蓄積する基盤を整備し、各種CAE計算結果を一元的に管理できる仕組みを構築する。過去の解析データに効率良くアクセスし、学習データとして活用することで、サロゲートモデル構築のハードルを大きく下げることができると考える。

将来的には、スパコン・クラウドを活用した大規模計算と、解析ソルバのライセンスの制約がないオープンソースソルバを用い、高速で学習データを作成し、本報のサロゲートモデルと最適化技術を組み合わせることで、新規設計に対し最短で最適形状を得られる仕組みを構築する。これにより設計工数の大幅な短縮を実現することを目指す。

## 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) 安達雅人, 川嶋俊一, オープンソースCAEとスパコン「富岳」を活用した最適設計システム構築, TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.34, No.1, 2024, p.21-26
- 4) 小澤曆世, 豊吉巧也, 泰地隆平, 和田義孝, 畳み込みニューラルネットワークを用いた疲労亀裂進展の予測 (第2報 相互作用が生じる段違いき裂進展の予測), 日本機械学会論文集, Vol.89, No.924, 2023, p.23-00032

## 用語解説

### \*1 CAE

Computer Aided Engineering の略。コンピュータを使ってさまざまなシミュレーションや解析を行う技術のこと。製品開発や設計の段階でよく用いられる。

### \*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 富岳

国立研究開発法人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。2025年現在でも利用できる。

### \*4 FEM

Finite Element Method の略。複雑な構造物や物理現象を微小な

要素(メッシュ)に分割し、各要素の性質を数値化して計算を解くことで全体の挙動を解析する手法。

### \*5 ラテン超方格法

実験や解析で用いるサンプリング手法の一つ。サロゲートモデル構築や感度解析等で、少数の点でも空間を効率よくカバーできる。

### \*6 遺伝的アルゴリズム

設計最適化や組み合わせ最適化で広く利用される最適化手法。解候補を「個体」として集団で扱い、適応度で選択しつつ交叉・突然変異を繰り返して世代交代させ、大域的に良好な解を進化的に探索する。

### \*7 決定係数

回帰モデルの性能を評価する代表的指標。1に近いほど予測精度が良好であることを示す。

### \*8 勾配ブースティング決定木

表形式データでよく使われる機械学習モデルの一種。小さな決定木を1本ずつ順番に作り、毎回「前の木が外した誤差」を修正するように重ねていくことで、精度を少しずつ高めていく。

### \*9 深層学習

多層ニューラルネットワークを用いる機械学習手法。データを層ごとに抽象度の高い特徴へ自動変換しながら学習する。

### \*10 パレート解

多目的最適化問題において、理想的な解にできるだけ近く、目的関数同士のバランスの異なる解のこと。

# 差動式コンベヤによる自動保管棚システムの開発

Development of Automatic Storage Shelf System Using a Differential Conveyor

徳本 力<sup>※1</sup>

Tsutomu TOKUMOTO

本稿では、バッファ保管棚やFMS（Flexible Manufacturing System）向けの、軽量かつ簡素、組立容易なスタッククレーンの構成と、その同時3軸数値制御システムおよびグラフ理論による動作計画法の開発事例について紹介する。スタッククレーンの主要構成要素である昇降コンベヤは、チェーンと相性の良い動滑車連結形差動機構を適用し、軽量化のみならず昇降部の配線レス化を実現している。本稿では、AGV（無人搬送車）連携を想定し、コンベヤ形を題材にしているが、原理的にはフォーク形スタッククレーンも製作可能である。

This paper introduces the development of a lightweight, simple and easy-to-assemble stacker crane structure for buffer storage shelves and FMS (Flexible Manufacturing Systems). It also introduces the development of a dedicated simultaneous 3-axis numerical control system for the structure, and a motion planning method based on graph theory. The lifting conveyor that is a major component of the stacker crane uses a chain-compatible differential mechanism based on a suspended-pulley. This realizes weight reduction and also eliminates the wiring in the lifting section. This paper assumes linking with an AGV (Automated Guided Vehicle) and describes a conveyor type system. However, in principle, it is also possible to produce a fork-type stacker crane.

## 1. はじめに

差動式移動装置<sup>1)</sup>は、構造軽量化、モータ集中配置による質量分散配慮設計、省配線化に特化した2自由度の動力伝達機構である。「差動」という言葉は、単一のチェーンやベルトを複数のモータで共有し、その押し引きバランスによって、平面的動作を実現するところに由来する。広知の機構として「T-Bot<sup>2)3)</sup>」「H-Bot<sup>4)</sup>」(図1(a)(b)参照)その改良形「Core XY<sup>5)</sup>」等が挙げられる。

これらの機構のトポロジをさらに単純化、整理すると、動滑車を連結した構造に帰着する(図1(c)参照)。

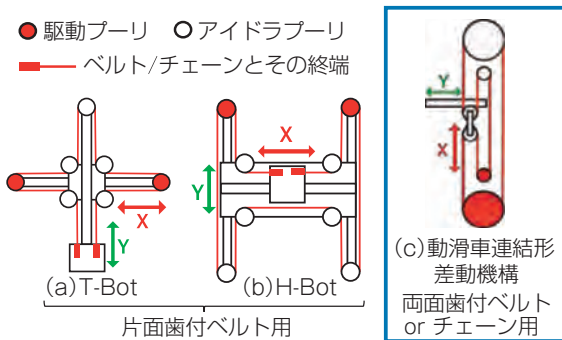


図1. 機構の原理図



図2. 実験機の外観

動滑車連結形差動機構は、変位と回転の2出力を無端状のループから得るため、回転による送り量 $Y$ は無制限であって、チェーンとの相性が良い。同一形態の機構は前例が少なく、四枝リハビリテーション機器<sup>6)</sup>やケーブル駆動平行ロボット<sup>7)</sup>等が知られているが、産業用直交ロボットや、コンベヤとしての応用例は、当社調べの範囲では見つかっていない。

本稿では、動滑車連結形差動機構をスタッククレーン形実験機として具現化し、軽量かつ省配線な自動保管棚を構成したので、その開発事例について報告する(図2参照)。

※1 DX・IT 研究開発センター

## 2. 実機構成と動作原理

### 2.1 実機の全体構成

実験機は、保管棚と走行軸付き昇降コンベヤを一体化した構造であり、昇降コンベヤは保管棚に設けられた3本のルール上を走行する台車を基礎としている（図3参照）。

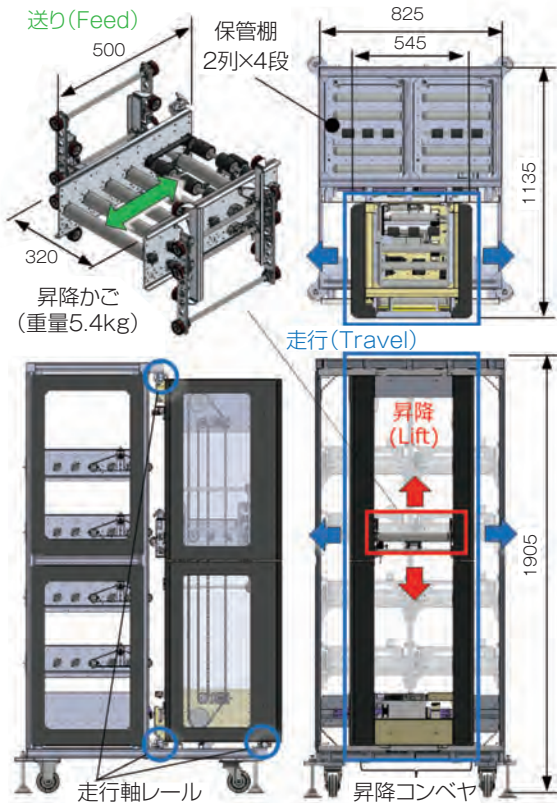


図3. 実験機の構成

実験機ではモジュラー設計や組立、保守性向上、軽量化を意図し、台車基底部に3基のモータを集中配置、これによってマトリクス形保管棚の入出庫動作全てを行っている。昇降かごおよび保管棚は機構による遠隔駆動によってセンサやアクチュエータを持たず、さらに、ローラの隙間を縫うように物体確認用の光電センサを配置することで、配線レスを実現している（図4参照）。

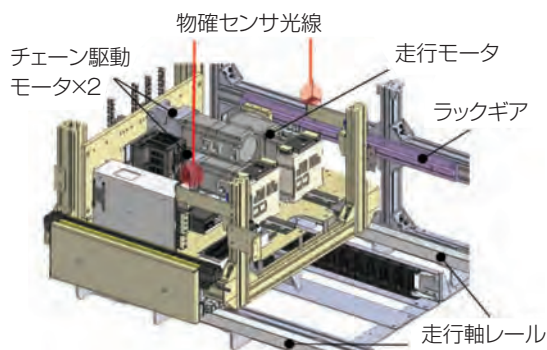


図4. 走行台車基底部

### 2.2 差動機構による昇降コンベヤの遠隔駆動

実験機における昇降コンベヤは、まるで操り人形のような吊り下げ構造であり、2基のモータの出力バランスにより動作を制御している。そのため、昇降かご部分に重いモータや配線の必要がなく、構造材をも軽量化している。側板はアルミニウム合金であり、ローラコンベヤの芯材も構造材の一部として活用している。目安として、今回使用のモータ1基と周辺部材質量は約3kgであるので、昇降かごのモータ移設による質量削減効果は概ね35%である。

差動機構の動作原理は、チェーン送り長さを追えば理解が容易である。送り長さ $c_1, c_2$ の加算結果がコンベヤの昇降量となり、減算結果がコンベヤ回転量となる（図5参照）。

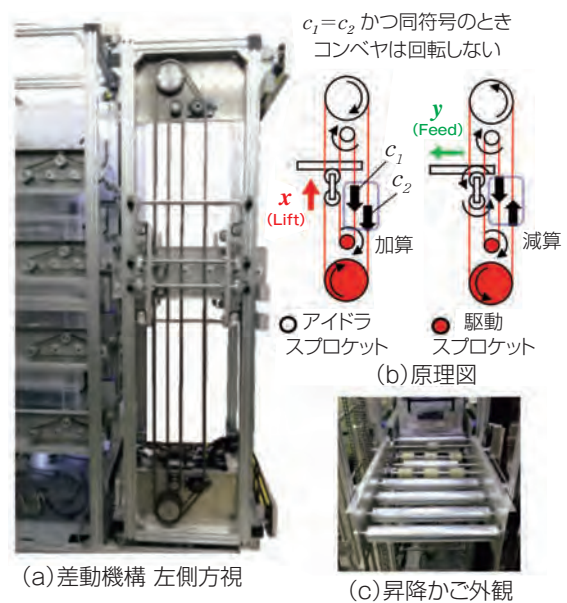


図5. 差動式昇降コンベヤ

### 2.3 入出庫用ドッキング機構

棚に格納された状態のワーク定位置は棚の奥にあり、昇降コンベヤから直接操作は困難である。入出庫動作とも、棚側設置コンベヤを駆動源とした押し出し/引込み動作を必要とする。

実験機では摩擦車を介したドッキング機構により、動力伝達と動作の連動を配線レスで実現している（図6参照）。

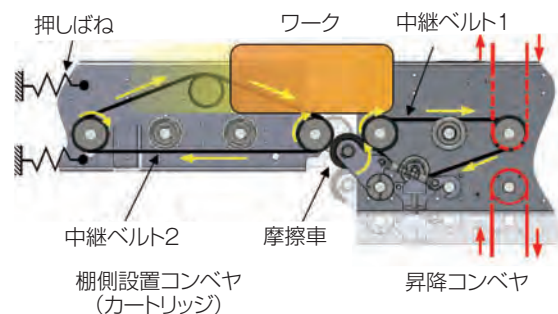


図6. ドッキング機構の概略図

### 2.3.1 昇降コンベヤのドッキング構造

昇降コンベヤを構成するローラのうち1本は差動機構を成すチェーンと直結された駆動ローラである。その回転出力を、中継ベルト1を介して最前列ローラに中継し、さらに、最前列ローラにドッキング用摩擦車を押し当てることで動力伝達経路を形成している (図7参照)。

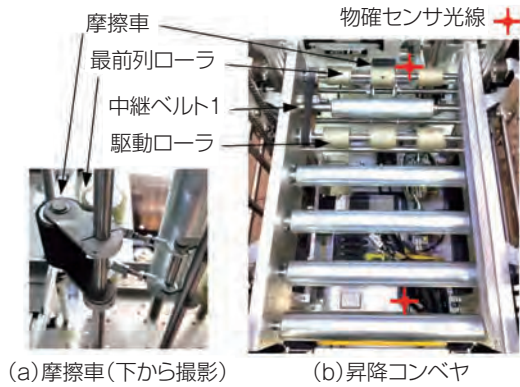


図7. 昇降コンベヤのドッキング構造

### 2.3.2 棚側設置コンベヤのドッキング構造

棚側設置コンベヤは「カートリッジ」の形に纏められ、筐体ごとスプリングによって弾性支持し、保管棚背面から着脱可能な構造としている (図8参照)。



図8. 保管棚背面

カートリッジ側の最前列ローラは摩擦車の押付けによりドッキングし、押付け力はスプリングのプリロード量で調整する。カートリッジ側も中継ベルト2を持ち、駆動ローラがワーク重心付近をとらえる設計としている (図9参照)。

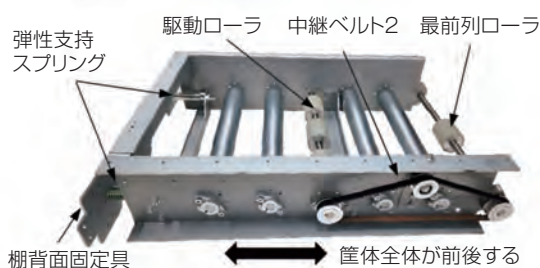
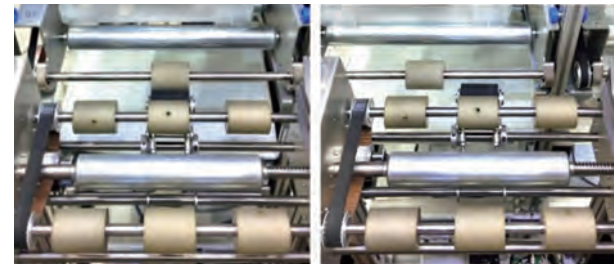


図9. カートリッジ単体

### 2.3.3 ドッキング動作 / すり抜け動作

カートリッジの最前列ローラはドッキング用摩擦車がすり抜けられるように幅が狭く設計されている。

ドッキング時は正しい進入経路と速度によってコンベヤ同士を接触させる必要があり、すり抜け時は障害物の隙間を縫うような軌道の算出が必要となる (図10参照)。



(a)ドッキング位置 (b)すり抜け位置

図10. 摩擦車とカートリッジの位置関係

## 2.4 使用モータと機械的諸元

実験機ではCiA402ドライブプロファイルに対応した、エンコーダ付ステッピングモータを採用した。ステッピングモータは低速域において強い保持トルクを持つため今回のような実験用小型昇降機の構成に好適である。モータと各軸の機械的諸元について表1に示す。

“CiA402”は制御モータ規格IEC61800-7内のプロファイル規定であり、制御レジスタ配置、動作ステートマシンについて定義している。制御ソフトをこの規格に沿って開発すればシステムの移植性を高めることができる。

表1. 実験機諸元

項目			
差動機構チェーン リンク数	RS35 600	-	リンク
差動機構モータ	(Oriental)AZM69M0K x2	-	
最大静止トルク	2	N・m	
小径側減速比	7	-	
大径側減速比	15	-	
小スプロケット歯数	14	-	
大スプロケット歯数	30	-	
走行モータ	(Oriental)AZM66AK-FC10UA	-	
最大静止トルク	3.5	N・m	
ピニオンギヤ	モジュール1.0 歯数30	-	
かごスプロケット歯数	14	-	
かごローラ径	φ50	mm	
昇降軸動作範囲	0~+960	mm	
走行軸動作範囲	-200~+218	mm	
設定速度 (3軸合成)	150	mm/s	

### 3. 数値制御

#### 3.1 差動式移動装置の位置に関する座標変換

昇降コンベヤ動作とチェーン送り長さの関係を明らかにするため、先行調査において、工作機に用いられる空間補正技術<sup>8)</sup>から着想を得、ガントリ型の簡易試験機を構築した。先行実験ではエンドエフェクタ座標をレーザー距離計、プリー回転角をエンコーダで測定し、重回帰分析により座標変換行列を帰納的に推定した<sup>9)</sup>(図11参照)。

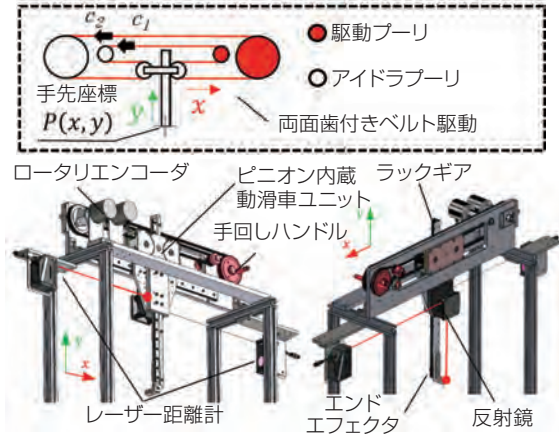


図11. 座標変換行列推定用試験機

結果、順運動学変換（現在のチェーン送り長さから手先座標を推定する変換）は式(1)、アダマール行列の逆行列、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

逆運動学変換（所望の手先座標から必要なチェーン送り長さを推定する変換）は式(2)、アダマール行列

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

によって、表現できることが確かめられた。

なお、スプロケットのピッチ円と、ローラ径もしくはピニオン径に差異があり、減速比が生じる場合は、手先座標空間を y 軸方向に定数倍伸縮させる処理が必要となる。

#### 3.2 三軸同時制御による直線補間

差動式移動装置は2基のモータが1本のチェーンを共有するので、NC機における早送り（G00命令相当）に対する挙動が、各軸独立に駆動される直交ロボットと大きく異なる。

特に速度プロファイルの加減速開始タイミングが一致しない時、各軸独立駆動の直交ロボットでは各軸先着順で目標に到達するが、差動式移動装置では飛び跳ねるように目標からオーバーランする軌道を描き、人間から見れば実に不可解な挙動を示す（図12参照）。

従って、差動式移動装置ではNC機における直線補間（G01命令相当）の制御が必須となる。

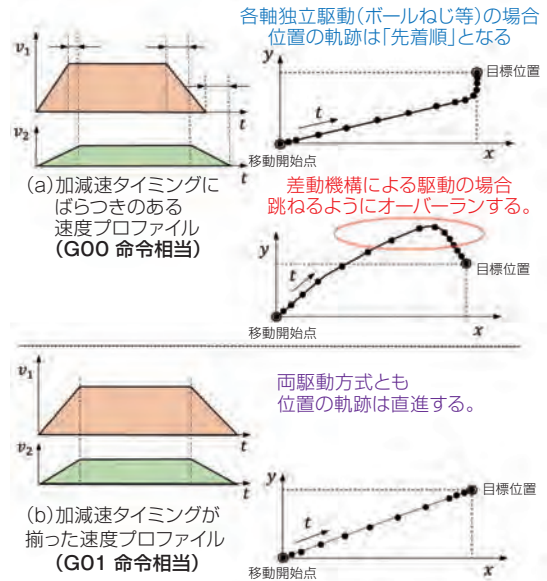


図12. 直線補間処理の必要性

その処理の原理は、極座標 - 直交座標変換である。目標の位置、速度、加減速度指令が与えられた時、はじめに位置の逆運動学変換を行い、チェーン送り長さ空間において、指令位置 (new) と現在位置 (current) の差分と、ベクトル傾きを求める。

$$\begin{cases} dc_1 = c_{1new} - c_{1current} \\ dc_2 = c_{2new} - c_{2current} \end{cases} \quad \dots (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{dc_1}{dc_2} \right) \quad \dots (4)$$

速度指令は、逆運動学変換の後、チェーン送り長さ空間にてL2ノルムにまとめた後、式(4)で求めた偏角により三角関数比を用いて分配する。

次数2のアダマール行列をH、実空間上の速度指令値を列ベクトルとして表したものを $v_{xy}$ とすると、チェーン送り速度指令 $v_1, v_2$ は、以下のように計算する。

$$v = \|Hv_{xy}\|_2 \quad \dots (5)$$

$$\begin{cases} v_1 = v \cos \theta \\ v_2 = v \sin \theta \end{cases} \quad \dots (6)$$

加速度・減速度指令値についても同様の計算を行えば、チェーン送り速度プロファイルの加減速タイミングを崩すことなく、適切なスケージングと分配処理が行われる。

この処理によって、一般的な多軸制御系と差動式移動装置に互換性を確保し、実験機では同時3軸制御により昇降軸と走行軸を連動させ、障害物で囲まれた領域を縫うような移動を実現している。装置構成の都合上、右手系・左手系を切替える際はy軸スケール係数を負に設定する。

## 4. 操作システム

### 4.1 移植性を重視した電装系

操作系は Beckhoff 社のソフトウェア PLC TwinCAT \*1および Microsoft .NET \*2アプリケーションから構成される。制御ロジックのほとんどは C# 言語 \*3で記述され、PLC ラダーは単純な信号分配処理と非常停止処理のみを実行する。

モータドライバと PLC 間のリアルタイム通信では EtherCAT \*4を、C# アプリケーションと PLC 間の非リアルタイム通信は ADS \*5を採用している (図13参照)。EtherCAT を採用した理由は、棚本体に設置した産業用 PC と、コンベヤ基底部のモータドライバ群を結ぶ可動配線の省配線化である。

モータドライバは IEC61800-7におけるプロファイル位置決めモードで動作させている。このモードではモータドライバ側が速度プロファイルを生成するため、リアルタイム性に関する要件ハードルは低く設定できる。

そのため .NET アプリケーション側を改修し、ORiN \*6等の対 PLC 通信ミドルウェアを利用すれば、据置型 PLC による電装系に当操作プログラムを移植することも可能である。

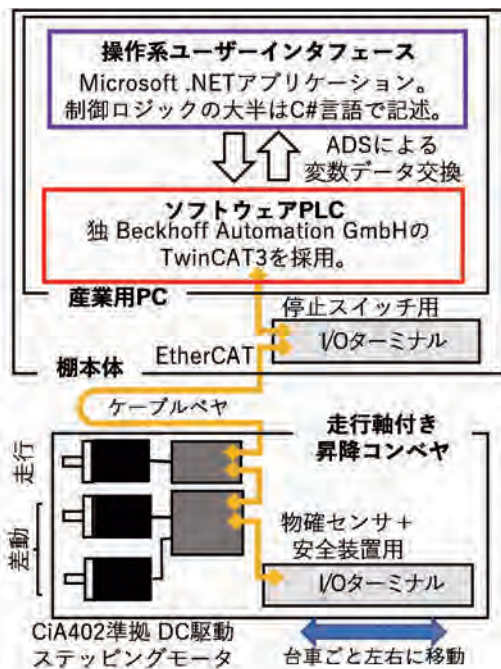


図13. 実験機の電装系

### 4.2 ふたつの命令キュー

ドッキング機能付き差動式コンベヤは、障害物の間を縫うような動作計画が必要となる。そこで、実験機では工作機械と CAM のエコシステムを模した軌道生成 / 命令実行の仕組みを採り、命令内容の抽象度により分離された 2 階層の命令キュー (待ち行列) を備えている (図14参照)。

上位グラフィックス入力やスケジューラーなど

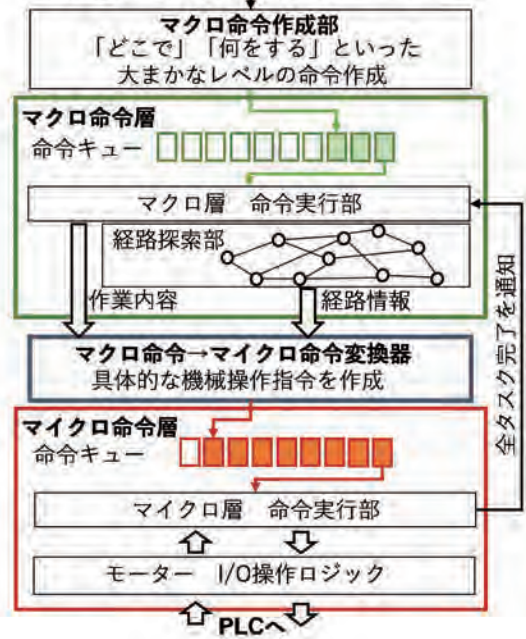


図14. 操作ソフトウェア (.NET アプリケーション)

どちらの階層も、中断 / 再開に対応した逐次実行キューを基底クラスとしており、異常系設計やカスタム対応が容易な造りとなっている。製作したユーザーインターフェース外観を図15に示す。

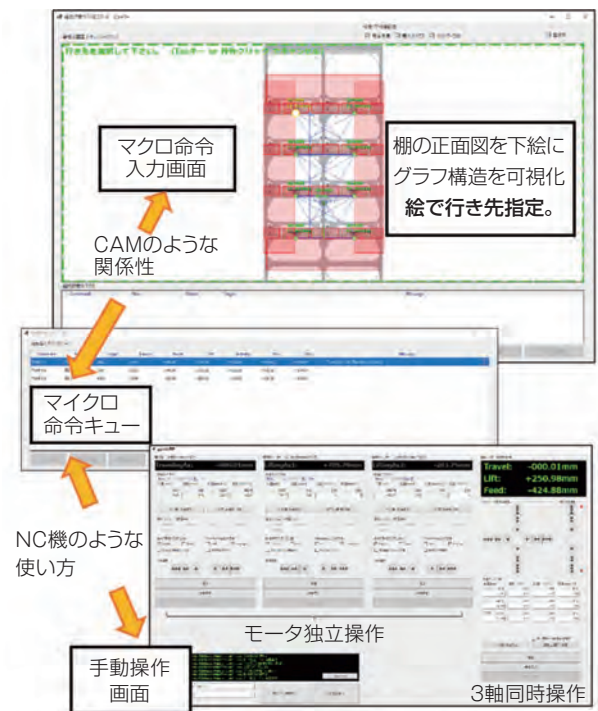


図15. 操作 UI (ユーザーインターフェース)

### 4.2.1 マイクロ命令層

この層は、機械直接操作命令を逐次実行するキュー構造である。NC機におけるGコードやMコード相当の、位置決めやI/O操作、ハードウェア起因のエラー処理を司る。

### 4.2.2 マクロ命令層

抽象的な命令、「n番目の箱を取ってきてほしい」といった内容を処理する層で、軌道ナビゲーション用の「グラフネットワーク分析器」を内包する。行き先連続指定のため、このレイヤもキュー構造を持ち、ワーク入替、整列、複数コンベヤによるバケツリレー運転や、上位システムの指示による連続運転を想定している。コンベヤに詰まりが発生した場合等、復旧に複合的判断が必要なエラー処理も、このレイヤを操作することで実現する。

### 4.2.3 マクロ命令 → マイクロ命令変換器

マクロ命令層のグラフネットワーク分析により得られた経路情報を機械操作用のマイクロ命令に変換し、マイクロ命令層のキューに転送する機能を持っている。CAMシステムにおけるポストプロセッサに相当する部分である。

## 4.3 幾何データの入力負担軽減

実験機の動作計画は、棚の幾何情報に基づくグラフネットワーク分析によって行われる。軌道計算に必要な幾何情報の入力負担を削減するため、データ構造は階層的に正規化しており、操作者は棚カートリッジの種類と配置のみ入力すれば良い。

### 4.3.1 属性付き頂点データ

属性付きの位置情報データであり、画面への表示制御や、ドッキングに掛かる情報が埋め込まれている。例えば、マクロ命令からマイクロ命令へ変換時、終端の頂点データにドッキング可の情報が含まれていれば、入出庫のためのコンベヤ操作指令を挿入する、といった使い方をする。

### 4.3.2 境界ボックス

カートリッジにおける軸受やローラ等、障害物を示す矩形データである。経路探索のためのグラフ構造は、全頂点間と境界ボックスの交差判定付き走査によって自動結線される（図16参照）。加えて異常な位置決め指令による衝突コース検知のため、境界情報は常時監視されている。

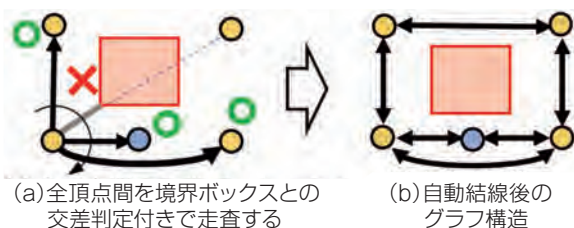


図16. 頂点間全走査(レイキャスト)による自動結線

### 4.3.3 カートリッジ・カタログ

カートリッジは頂点データと、境界ボックスの組み合わせで表現する（図17参照）。新機種/特型カートリッジを扱う場合のみカタログを編集する。払出しや入庫待機位置は、境界ボックスを持たない頂点のみのカートリッジとして定義する。

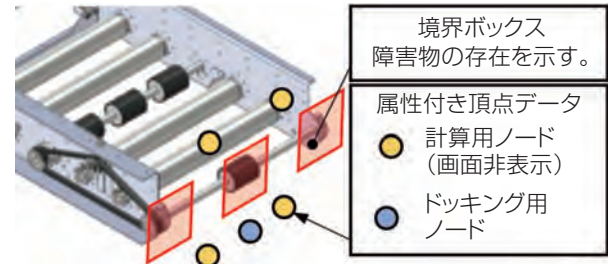
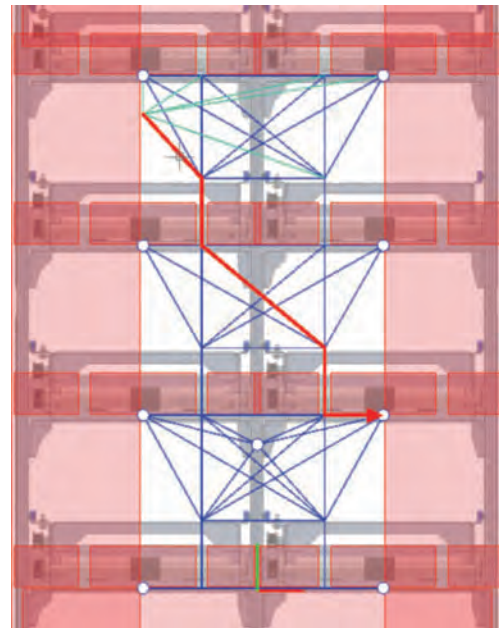


図17. カートリッジの幾何データ（データは平面）

### 4.3.4 棚の幾何データ

棚の幾何データは、複数カートリッジの配置という形で表現する。カートリッジの種類と相対座標、識別用の個体番号が割り振られている。

実験機では計2列×4段、計8基のカートリッジを配置している。棚の幾何データによる頂点データ数は41個であり、境界ボックスの数は28個、全頂点走査と境界ボックス交差判定によるレイキャストで自動結線された辺データの数は186本である。経路探索による動作計画の様子を図18に示す。



白丸：オペレータが選択可能な頂点  
青線：幾何データによる静的グラフ構造  
薄線：経路外からの復帰用、動的グラフ構造  
赤線：経路探索結果

図18. ネットワーク分析による動作計画

## 5. 実機実験

### 5.1 実験内容

実機実験にて、箱の入出庫タスクをマクロ層にプログラムし、2階層のキューでの逐次実行の様子を確認した。

### 5.2 ワークの配置とセットアップ

実験機では計2列×4段、計8基のカートリッジを配置している。ワークの内容はごくありふれた電設資材をコンテナボックスに収納したもので、重量は最大8kgである。

ボックス底面に補強リブがあり、ローラとの摩擦伝動に支障が生じるので、対策として底板を貼り付けた。

### 5.3 タスクの実行

実験機のコマンドはグラフィックス入力である。実機正面図を下絵として各頂点が強調表示され、操作者は行き先をクリック入力する。行き先情報はマクロ命令キューに蓄積され、起動指令により経路探索が行われる。

経路探索アルゴリズムは、差動式コンベヤが比較的平面上を自由に移動する、という理由からA\*(エー・スター)を選択した。移動コスト指標は頂点同士の距離であり、探索範囲絞り込み指標は到達点までの距離である。

探索結果は機械操作系マイクロ命令に変換後、マイクロ命令キューで逐次実行される。

マイクロ命令キューが空になると、次のマクロ命令が呼び出され、経路探索が実行される。

## 5.4 実験結果

### 5.4.1 チェーンに掛かる張力

実験機では差動機構を成すチェーンを垂直方向にレイアウトしている。連結型動滑車の上方のスプロケットに掛かるチェーンは、昇降コンベヤ自重による張力が掛かっている。一方で、下方のスプロケットはコンベヤの昇降により余ったチェーンをフックに引っ掛けているような状態で、コンベヤ自重による張力は掛かっていない(図19参照)。

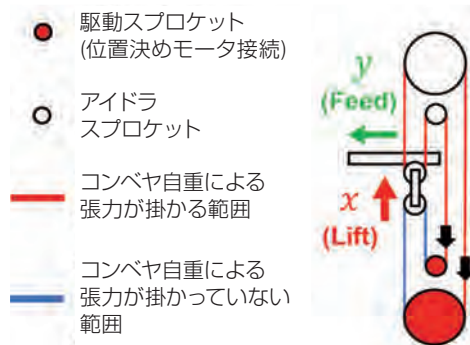


図19. 差動機構チェーンに掛かる張力

### 5.4.2 実機の運転

ドッキングによる動力伝達の有用性を確認するため、マクロ命令層に出庫タスクをプログラムし、試運転を行った。実機試運転の様子を図20に示す。通し運転による、機構の動作原理、座標変換、動作計画、操作システムの結合テストは動作し、ひとまずの成功と呼べそうである。

モータのトルク過不足に最も影響する運動は、下降時の慣性を伴う高速移動であり、本実験では試行錯誤的に3軸合成速度を150mm/s、加減速度を150mm/s<sup>2</sup>とした。

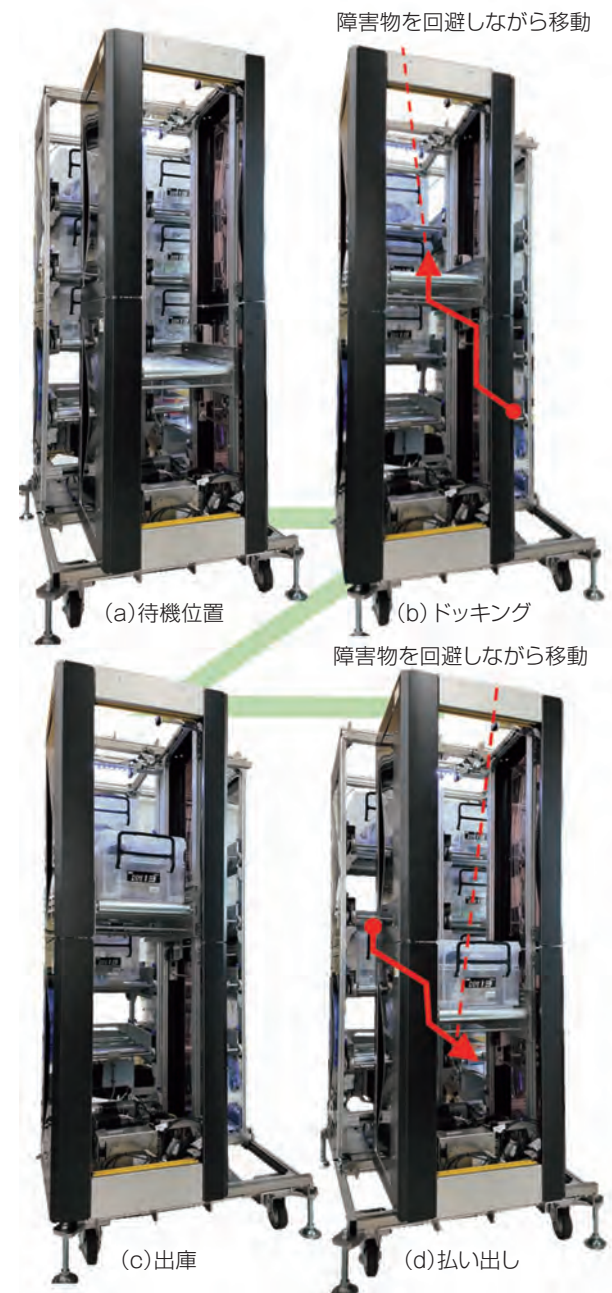


図20. 出庫タスクの試運転

### 5.4.3 出庫動作時の動力伝達

図20(c) 出庫動作を右側方から撮影した (図21参照)。

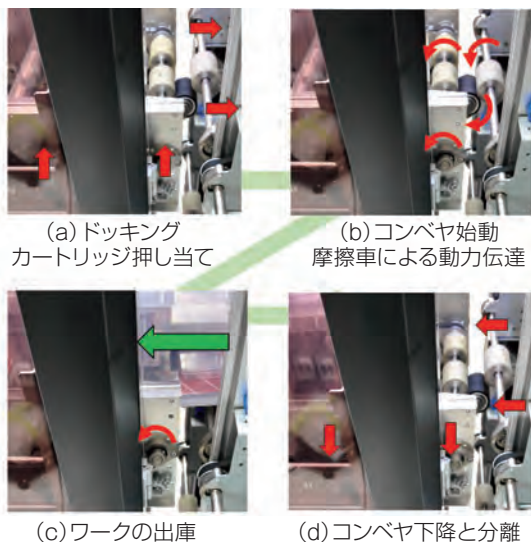


図21. 出庫動作の詳細

### 5.5 考察

この実験では軽量化・省配線設計のみならず、狭小配置かつ有向・有手順な機構の操作をグラフ理論による動作計画によって解決し、設計手法の妥当性について確認した。

## 6. おわりに

差動機構はモータ集中配置による質量分散配慮設計や機構軽量化の技巧として広く用いられている。今回はチェーンと相性の良い、動滑車連結構造の差動式コンベヤを実機創案し具現化した。差動式コンベヤは軽量省スペースかつ組立性に優れ、条件が揃えば配線レス化が可能である。

当開発では2つの「複雑さへの対処」がキーとなった。ひとつは、アダマール行列への対処である。静的な観点では単純な符号の集まりに見えるが、速度プロファイルを通して観た時、特に加減速タイミングを正確に与えなければ、機械装置としては実に不可解な動作をする。実験機は、かごにチェーンを掛けただけの簡易構造で複製自体は容易だが、その一方、座標変換にアダマール行列を含む機構の実験では慎重さが求められる。

もうひとつは、ソフトウェアの複雑さへの対処である。命令キューの多階層化と幾何データの構造正規化、グラフ理論における辺リスト自動結線機能は効を奏した。

今後の課題として、EtherCATの持ち味を生かした制御システムのリアルタイム性向上、位置精度の評価、数値制御とチェーンの組み合わせによる、さらなる軽量化・制御手法の開拓に取り組んでいく。

### 参考文献

- 1) 徳本 力, 差動式移動装置, 特許 7436759号, 2024-02-13
- 2) 例えば, FESTO AG&Co.KG, リニアガントリ EXCT 形 [https://www.festo.com/gb/en/p/linear-gantry-id\\_EXCT\\_LP/](https://www.festo.com/gb/en/p/linear-gantry-id_EXCT_LP/), 2025-5-14 閲覧
- 3) 例えば, FESTO AG&Co.KG, 平面ガントリ EXCM 形 [https://www.festo.com/gb/en/p/planar-surface-gantry-id\\_EXCM\\_FP/](https://www.festo.com/gb/en/p/planar-surface-gantry-id_EXCM_FP/), 2025-5-14 閲覧
- 4) キヤノン株式会社, 直交 2 軸移動装置, 特開平03-055177,1991-03-08
- 5) 李 丞株, 高精度な位置決めと高速化を両立するベルト駆動機構, 精密工学会誌, Vol.90,2024, p.464-465
- 6) Polibrixia S.r.l., Physical exercise machine, EP2865363B1,2016-05-25
- 7) Foroogh Behrooz, et al., A Three Actuator Cable-Driven Parallel Robot with a Rectangular Workspace., Journal of Mechanisms and Robotics,17(1),2025,010905
- 8) 例えば, Hexagon AB, ETALON LASERTRACER-NG <https://hexagon.com/ja/products/etalon-lasertracer-ng>, 2025-5-14 閲覧
- 9) 徳本 力, 差動式薄型 2 軸直動装置, SICE SI,2023,1E5-01

### 用語解説

#### \*1 Beckhoff TwinCAT

IEC 61131準拠のソフトウェア PLC。  
Beckhoff Automation GmbH の登録商標。

#### \*2 Microsoft .NET

ソフトウェア実行基盤。Microsoft Corporation の登録商標。

#### \*3 C# 言語

ソフトウェア記述言語。Microsoft Corporation の登録商標。

#### \*4 EtherCAT

リアルタイム性と省配線性に優れた産業用ネットワーク。  
Beckhoff Automation GmbH の登録商標。

#### \*5 ADS (Automation Device Specification)

Beckhoff Automation GmbH による TwinCAT 用プロトコル。

#### \*6 ORiN (オンライン)

PLC やクラウドサービスへの通信をサポートするミドルウェア。  
社団法人日本ロボット工業会の登録商標。

# 薄膜センサを用いた歯車面圧測定技術の開発

Development of Gear Surface Pressure Measurement Technology Using Thin Film Sensors

河野 浩二<sup>※1</sup>  
Kouji KOUNO

徳本 力<sup>※1</sup>  
Tsutomu TOKUMOTO

松田 星司<sup>※2</sup>  
Seiji MATSUDA

薄膜センサを用いた測定技術に関して知見を有する東京都市大学<sup>\*1</sup>と共同開発を行い、当社製の歯車面圧測定技術を確立する。一歯に複数のセンサを形成し歯車の歯丈方向の状態推移データを測定し、また歯幅方向の偏荷重データを測定する。それらの測定データは解析技術との突合せによって、より広範な基礎技術データの蓄積に寄与する。また、周辺技術として試験機を構成する産業用ネットワーク、無線テレメトリック技術、トップコート技術、歯車表面の加工精度向上等の知見を得る。

Our company conducted joint development with Tokyo City University, which has expertise in measurement technology using thin film sensors, and will establish our own gear surface pressure measurement technology. Multiple sensors will be formed on one tooth to measure the state transition data in the tooth length direction and the offset load data in the tooth width direction. Comparisons of these measurement data with analytical techniques will then contribute to the accumulation of a wider range of basic technical data.

## 1. はじめに

CAE等の予測技術を用いる際に基礎となる実測データは重要である。歯車の状態量測定にあたり面圧測定技術は重要かつ困難な測定技術である。一般的には使い捨てで不可逆の面圧シート、格子状にセンサ配列したシートセンサ、圧力センサ等が思いつくが、歯車同士が噛合う状況にてそれらを用いた計測は連続性・耐久性・センサスペースの都合で実現が困難である。薄膜センサはそれらのデメリットをある程度解消したセンサであり、 $1\mu\text{m}$ 以下と薄く、耐久性のあるコーティングを施すことで過酷な環境下での使用も可能である。薄膜センサを用いた歯車面圧測定技術に関して知見を有する東京都市大学との共同開発を通じて前記計測技術の習得を目指す。

## 2. 概要

### 2.1 目的

薄膜センサを用いて歯車歯面における面圧測定を行い、歯面にかかる圧力の時間・位置の状態推移データを取得する。

### 2.2 実験内容

当社製減速機 HMTK1542U5S-K3YC ギヤユニット内の平歯車の歯面に薄膜センサを形成する。減速機テストベンチを設置して、静的・動的な歯車面圧測定を行う。

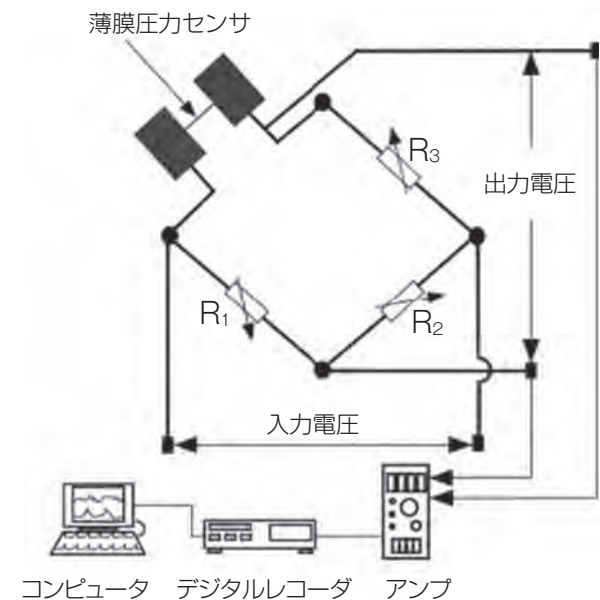


図1. 薄膜センサ計測回路

※1 DX・IT・研究開発センター

※2 モーションコントロール事業部 製造統括 生産技術部

## 2.3 計測原理

計測回路を図1に示す。圧力感知材料であるCu-Mn-Ni合金は、圧力の変化に応じて電気抵抗が変化する。この合金を用いて、製作した薄膜圧力センサをホイートストンブリッジ回路の一辺に組み込み、圧力によるセンサの抵抗変化を電圧の変化として計測する。出力電圧の変化はアンプにて増幅し、デジタルレコーダで記録される。ちなみに薄膜センサは組成の違いによりひずみ感知材料・温度感知材料としても活用できる。

## 3. 薄膜センサ

東京都市大学の三原雄司教授は薄膜センサの基礎的な研究と計測運用を長年手掛けられておりエンジン回りの過酷な計測にも多くの知見を持っておられる<sup>1) 2) 3)</sup>。多くの企業と共同開発・共同研究・受託開発が行われている。今回の薄膜センサは以下の懸念がある。

- ① 面圧をどのように検出するか
- ② センサ部を歯車曲面上に製作する難度
- ③ 歯車歯面に高い面圧がかかり、かつ摺動する
- ④ センサ信号出力は微小であり、ノイズ対策が重要
- ⑤ 回転体計測のため無線テレメータ技術が必要
- ⑥ 減速機内の配線の取り回し方法・干渉・ノイズ対策

また金属表面への絶縁皮膜の知見とセンサ保護のための保護被膜の知見も重要である。図2にセンサの概略寸法を示す。センサ部の線幅は $10\mu\text{m}$ 、長さは $1\text{mm}$ であり微小範囲の圧力検知が可能である。また膜厚は $0.2\mu\text{m}$ 、絶縁皮膜と保護被膜分の厚さを加算しても $6.2\mu\text{m}$ であり、測定に与える影響は軽微と考える。図3に面圧測定手法比較を示す。フィルム状の圧力センサも市販品・開発品が存在するが耐久性と薄さに関して本薄膜センサが勝る。また市販の圧力センサは歯車への追加工が必要な点と特に深さ方向の必要寸法に難がある。歯車状態量を測定する際に歯車への影響は最小限に留めるためできるだけ薄いセンサ、歯車追加工も最小限を心掛ける。今回は現行歯車を用いて必要最小限の研磨工程のみ追加工して面圧測定実験を行う。

## 4. 歯車歯面の前処理

センサ蒸着前に歯車歯面の研磨を行う。研磨工程は薄膜センサの絶縁性やセンサの付着強度を左右する重要な工程である。薄膜センサは歯車と電気的絶縁を取るために絶縁膜を形成する必要がある。ノイズ対策上、決められた絶縁抵抗値を確保する必要があり、そのためには絶縁膜の厚さのみならず歯車歯面の表面粗さが重要なパラメータとなる。

図4に研磨のイメージ図を示す。尖り部では電気的な絶縁を担保することが難しく、絶縁膜の厚さを均一にするために歯車歯面の表面粗さを均すことが効果的と分かる。図5に実際に使用する歯車の研磨前のものと研磨後のものを示す。

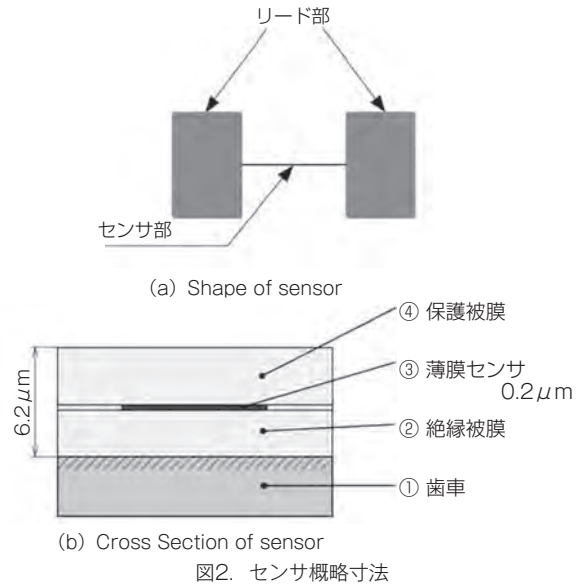
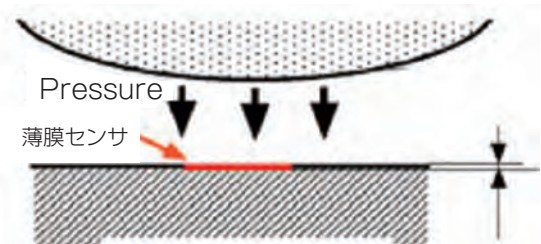
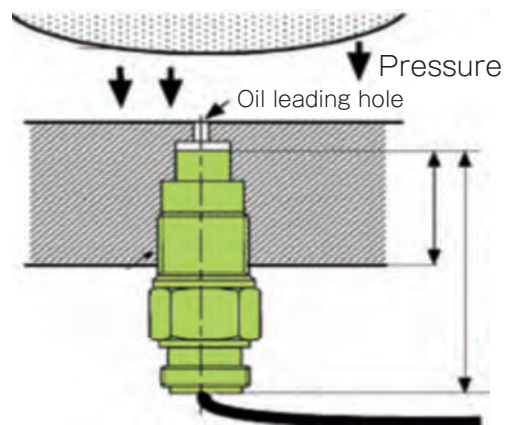


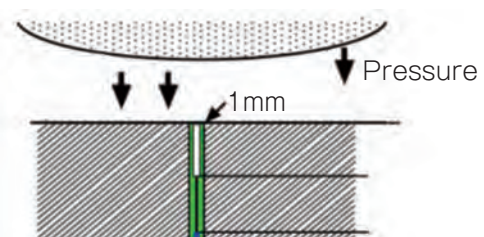
図2. センサ概略寸法



(a) 薄膜センサによる圧力測定



(b) 流体を介した圧力センサ



(c) 接触式の圧力センサ

図3. 面圧測定手法の比較

## 5. センサ構成

図6に実際に蒸着した薄膜センサを示す。リード部は図1に記載したアンプに接続する。センサは歯車のピッチ円上に形成することで歯車の動力伝達の実態解明に役立つ。図7にアンプまでの配線取り回し方法について示す。センサと一緒に形成したリード部はリード線と接続するがその位置は大きく分けて歯面出しと端面出しに分かれる。歯面出しは同一曲面上にリード部とリード線の接続部を形成したもので比較的簡単に形成できるが歯車歯面に配線することになるので、配線部が相手側歯車と接触しない歯面位置に構成する必要がある。端面出しは歯車の側面までリード部を伸ばしたものである。先述の表面粗さとノイズの関係やエッジ部の研磨工程を考えると非常に困難である。今回は歯幅全体を使って動力伝達している歯車の構成のため、困難な端面出しを行う。図8にセンサ形成後に端面出しした現物写真を示す。薄膜センサのリード部が歯車歯面→歯車エッジ部→歯車端面と経路してリード線に接続されている。また、断線やノイズ対策のためモールドして固めてある。図9にセンサの形状と実際の歯車にセンサ形成・蒸着した部分の拡大図を示す。(a)は標準型・歯面中央・ピッチ円上に一カ所のセンサ構成である。(b)は偏荷重計測型・歯すじ方向に三カ所・ピッチ円上にセンサ形成した構成である。(c)は状態推移計測型・歯たけ方向に三カ所・ピッチ円とその周辺にセンサ形成した構成である。それぞれ計測の目的に応じて使い分ける。いくつかの製造工程見直しを経たのちに完成に至った。

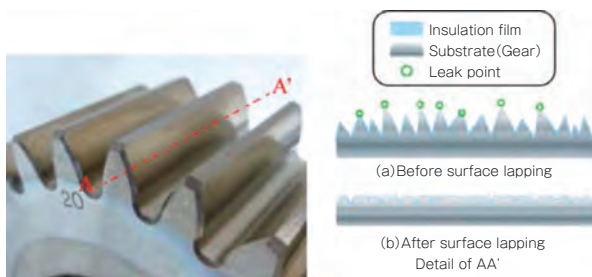


図4. 研磨前後の表面イメージ

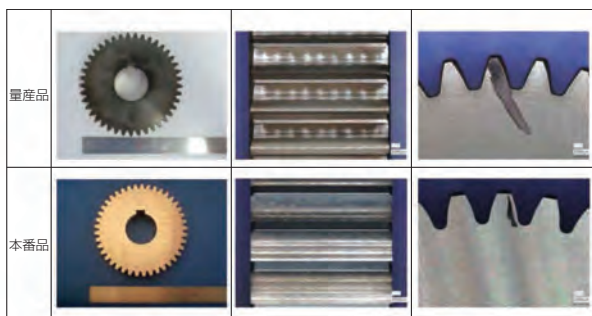


図5. 研磨前(量産品) 研磨後(本番品)の歯車

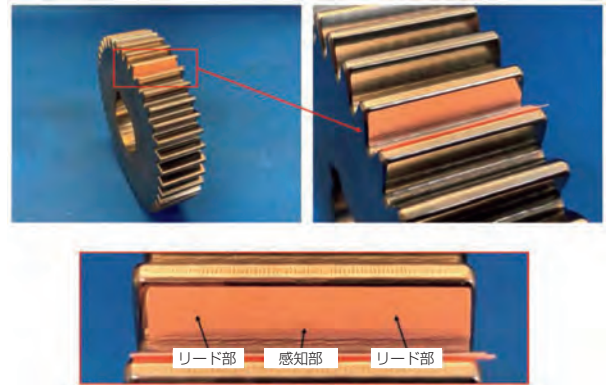


図6. 歯車歯面に蒸着した薄膜センサ

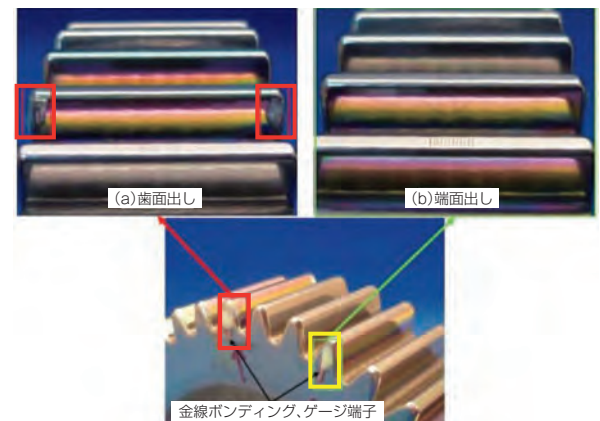


図7. 配線取り回し位置

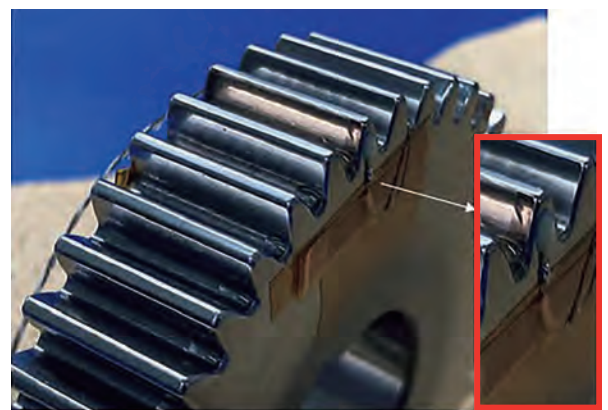
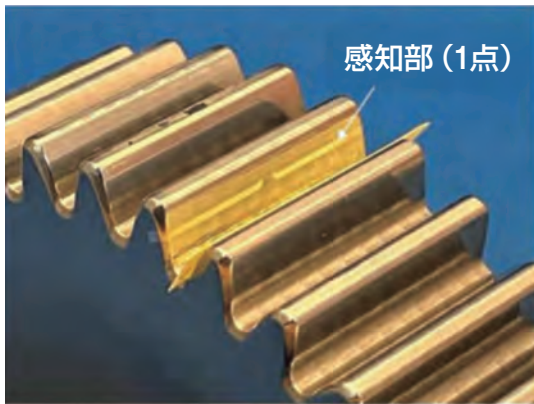


図8. 端面出しの実際



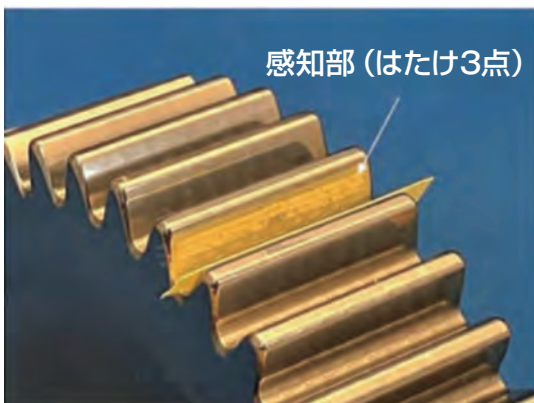
感知部 (1点)

(a) ピッチ円位置、歯面中央部、感知部 1 点



感知部 (はすじ3点)

(b) ピッチ円位置、歯すじ方向、感知部 3 点



感知部 (はたけ3点)

(c) ピッチ円+周辺位置、歯たけ方向、感知部 3 点

図9. センサ形状・センサ配置

## 6. 校正・センサ出力確認

図10に圧力容器とセンサ付き歯車にて校正の様子を示す。圧力容器にセンサ付き歯車を投入し歯車全体に圧力かける。センサの検知部以外はほぼ不感のため検知部の抵抗値変化が電圧換算して出力される。図11に薄膜センサ出力と圧力容器の圧力計のグラフを示す。センサ出力と圧力計はほぼ線形の関係になっている。図12に複数センサ出力と圧力容器の圧力計のグラフを示す。図11と同様にほぼ線形の関係であり、センサごとの出力感度の違いが分かる。

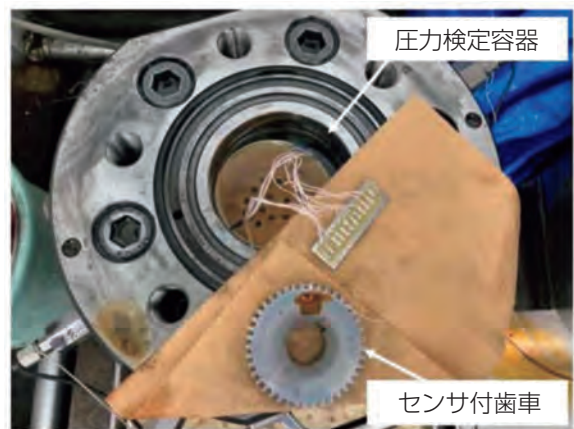


図10. 圧力検定容器とセンサ付歯車

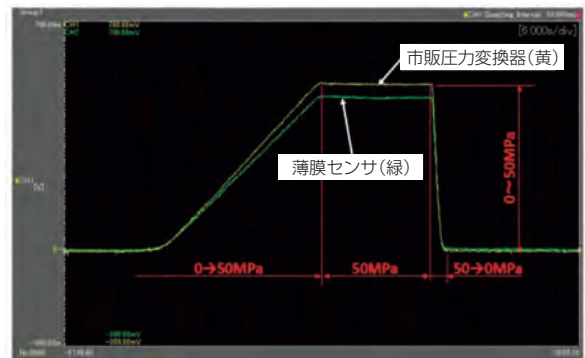


図11. 感知部が 1 カ所のセンサ付き歯車の出力

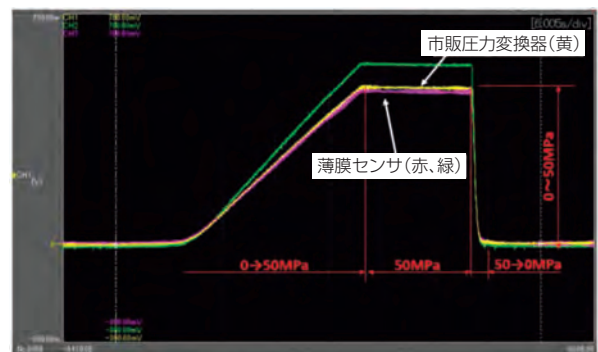


図12. 感知部が 3 カ所のセンサ付歯車の出力

## 7. 無線テレメータ

薄膜センサの出力を計測器に伝えるために無線式テレメータを用意する。こちらは東京都市大学経由で入手した無線テレメータであり歯車がついている回転軸と一緒に回転する。図13に無線テレメータを示す。無線テレメータは薄膜センサから出力される微小信号を電波に乗せて外部の計測器へ送る。薄膜センサから無線テレメータへは周辺部材とケーブルが干渉しないように回転軸に開けた穴を通じて配線を行う。ケーブルは摺動ノイズ対策として回転による遠心力の影響を受けにくいように回転軸の中心部を通り、樹脂によって固定される。ギヤユニットケース内に設置された受信アンテナを介して電波信号を受信し計測器にて信号を取り込む。

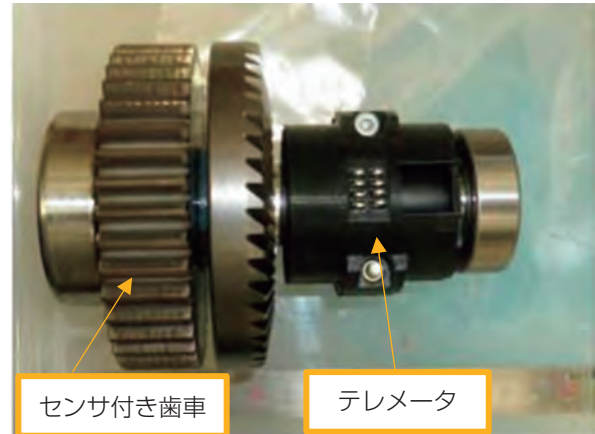


図13. 無線テレメータ

## 8. 試験機

さまざまな負荷条件下での歯車面圧データを取得することを目的に回転している歯車に負荷を掛ける試験機を用意した。ギヤユニットの入力軸はサーボモータにより駆動される。多段の減速歯車を介して出力軸でパウダーブレーキによる負荷をかける。正転・逆転による歯車面圧の違い、速度の違いによる歯車面圧の挙動、組立精度の影響等を測定することで歯車状態を推測する。歯車から無線式テレメータを通して3点の面圧データ（ひずみデータ）と1点の温度データを取得する。装置側では入力軸・出力軸にトルク計を接続し入出力のトルクを常時計測する。その他ギヤユニットの変位・振動・偏芯等、歯車に影響を与える可能性ある因子を適宜測定する。試験機はサーボモータで駆動し、高負荷試験・急加速・急減速・プログラム運転等に対応する。そのため、試験機はモーション制御を主に担当するPLCと計測データ収集を主に担当するPLCに分かれそれぞれが独立して機能している。産業用PCにてそれぞれのPLCからデータを収集しどのような動きの時にどのような歯車の状態か歯車周辺の状態を含めて統合的に計測可能な試験機を構成している。図14に試験機の構成イメージを示す。図15に実物の写真を示す。左側に見えるのがサーボモータ+トルク計+減速機+トルク計+パウダーブレーキで構成されるテストベンチである。右側に見えるものは先述したモーション制御用PLCとデータ計測用PLCと産業用PCで構成される制御盤である。今後の改良と拡張と社内設備運用を考慮して第一弾はオープンラックにて製作した。面圧測定技術とは直接の関係はないが当試験機は制御方法・データ収集方法の部分でも秀逸な点が多いため将来的に他設備への転用やデータ収集手法の課標準としての運用を考えている。

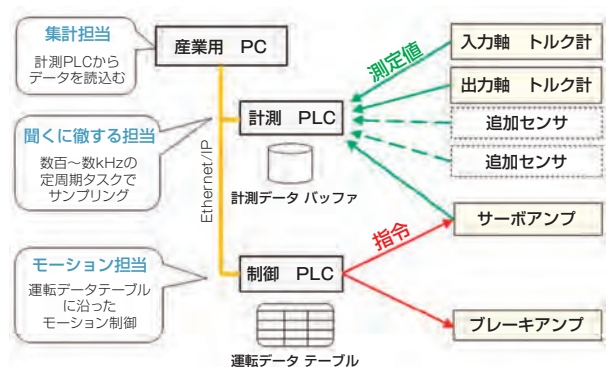


図14. 試験機の構成イメージ

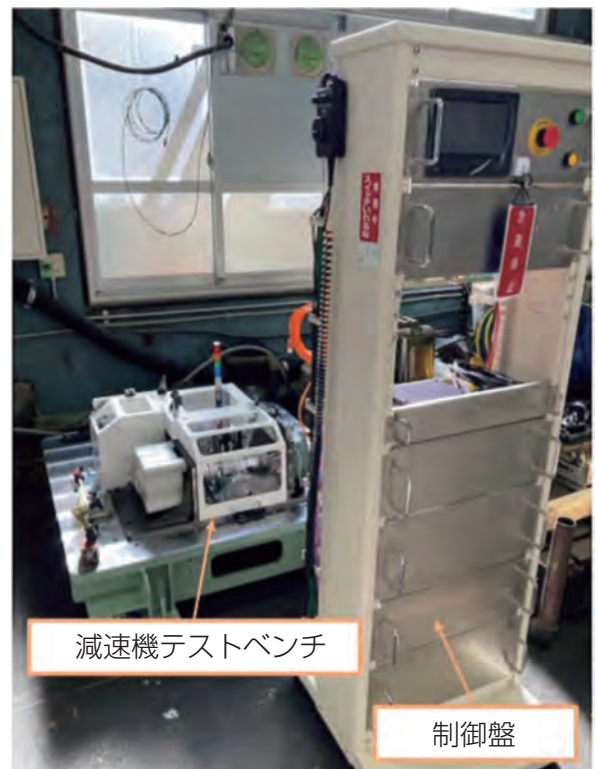


図15. 試験機

## 9. 実験

### 9.1 事前検証

薄膜センサによる面圧測定の前に歯元にひずみゲージを貼り付けし、歯にかかるモーメントと面圧の相関関係を確認する。図16に歯にかかるモーメントと歯元に貼付けするひずみゲージのイメージ図を示す。また、試験機で実際に試験をする前に手動でギヤユニットを動かして無線テレメータの機能確認とセンサ・ケーブルの活線確認を行う。図17にその様子を示す。

- ・平歯車上のセンサ（ギヤユニット内センサ付歯車）
- ・無線テレメータ送信機（ギヤユニット内テレメータ）
- ・受信アンテナ+無線テレメータ受信機
- ・計測器

の順で平歯車の信号が伝達される。図18にセンサ付き平歯車が組み込まれたギヤユニットを示す。無線テレメータの電源スイッチ、電池への充電等の作業のため大きめの覗き窓を開けてある。図19に手動で入力軸を回転させた場合の計測器に表示される計測データを示す。センサ面が相手側歯車と噛合った時の出力が確認できる。歯車歯面の保護のため潤滑剤を塗布して耐摺動特性を改善している。通常センサ部は清浄にする方が好ましく乾式でデータ測定を行う事もあるが今回は頑強な保護被膜のため潤滑剤を塗布し、通常使用に近い状態で計測を行う。図22にギヤユニット内部の取合いを示す。

### 9.2 稼働実験

図23に試験機による実験風景を示す。図24に試験機で負荷をかけながら回転させたときの計測データを示す。



図16. 歯にかかる力と歯元変形を検出するひずみゲージ



図17. 手動でのテレメータ機能確認

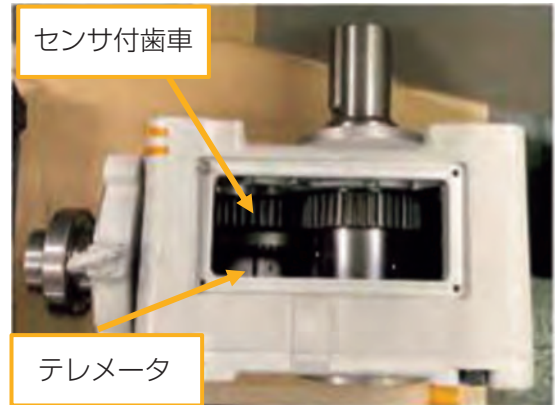


図18. テレメータ組み込み済ギヤユニット

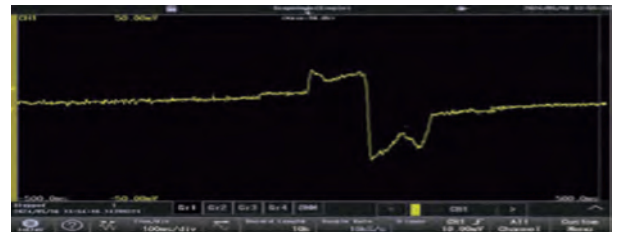


図19. 手動負荷時のひずみゲージ出力信号

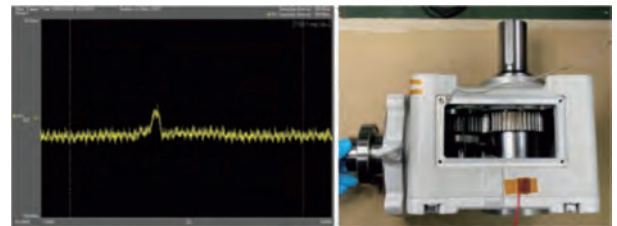


図20. 手動負荷時の薄膜センサ出力

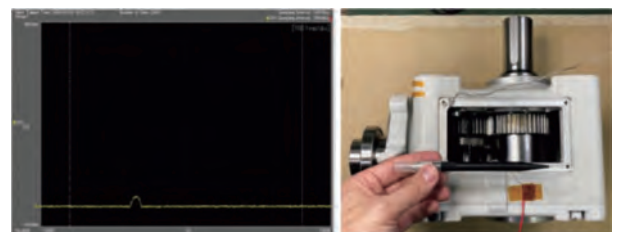


図21. 薄膜センサに鋼球を押し付けた時の出力

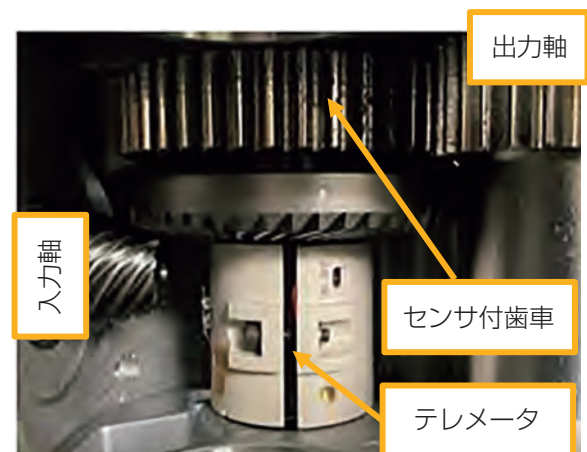


図22. ギヤユニット内部

ひずみゲージの出力信号3点と温度データ1点が問題なく取得できていることが確認できる。図25と図26にギヤユニット正回転時と逆回転時のひずみゲージ出力を示す。ひずみゲージの出力が3点で大きく異なり、正回転時と逆回転時でセンサ出力の傾向が逆転する。正回転時と逆回転時で歯車の偏当たりが原因と思われる偏荷重の分布が確認できる。図27に無線テレメータからの信号を制御盤に取り込み、ひずみ信号以外のギヤユニット周辺の変位センサ等の各種信号、サーボモータの各種情報、入力側トルク計のトルク値、回転速度、出力側トルク計のトルク値、回転速度、抵抗負荷のパウダーブレーキの各種信号と合わせて試験機のシステムのあらゆる信号を取り込んだ計測データ表示画面を示す。中央部の3つの信号は歯元のひずみ出力である。

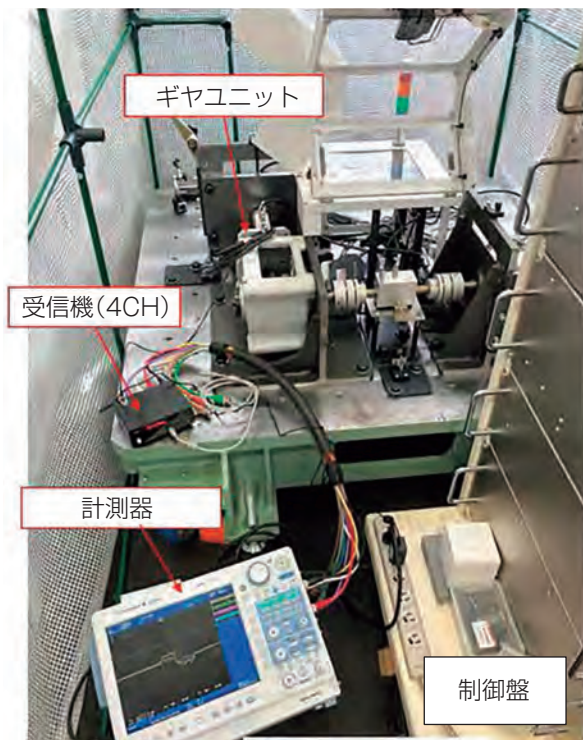


図23. 実際の実験風景



図24. 計測器で表示された各種信号

歯元のひずみ信号やトルク信号が脈動している状況やそれが歯車の噛み合いと連動していることが確認できる。

## 10. 今後

今回は歯にかかるモーメントをひずみゲージで測定したが次回からは薄膜センサによる面圧測定を実施し、歯にかかるモーメント力との比較と検証を行う。あるいは同時計測を行う。組立精度と歯にかかる偏荷重・偏当りの関係性を解明し、より高品質な製品への反映を行う。回転位相による特長的な挙動の有無確認を行う。正転・逆転のギヤユニットの挙動・状態量の把握とケースの影響確認と対応を実施する。ベアリング・オイルシール等ギヤユニットを構成する機械部品の変形・強度・構造等の影響・状態量の把握を行う。CAE解析のための基礎データを多く積み上げる。最低でも回転数・トルク・10温度等の条件は条件が許す限り多く実験を行う。図28に歯車の面圧解析例を示す。複雑形状歯車への対応・小型歯車への対応を検討する。図29図30に機能的に不十分で完成に至っていないが複雑形状歯車へのセンサ蒸着を示す。今回の計測実験の主要構成要素である無線テレメータの非接触給電化と回転系以外への適用検討を行う。

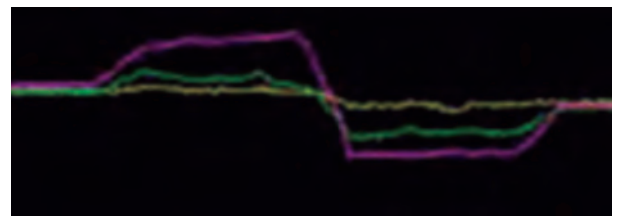


図25. 正回転時のひずみ3点分出力

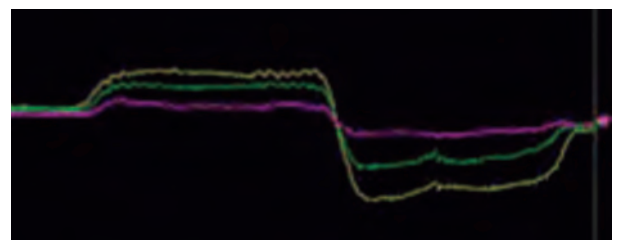


図26. 逆回転時のひずみ3点出力

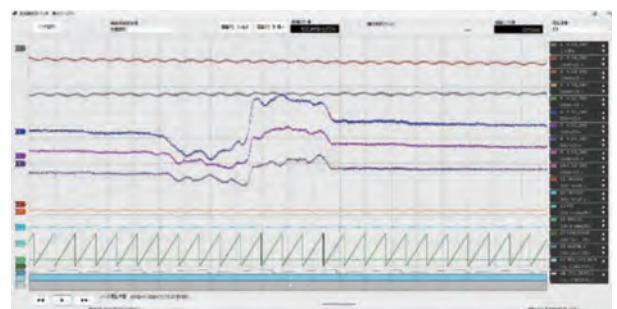
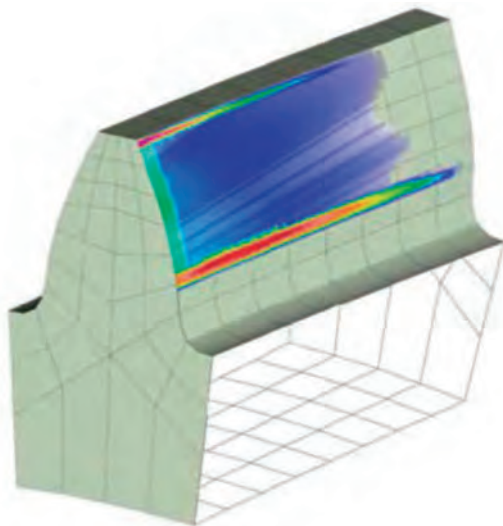


図27. 制御盤に取り込んだ各種データ



面圧分布

図28. CAEによる面圧解析例

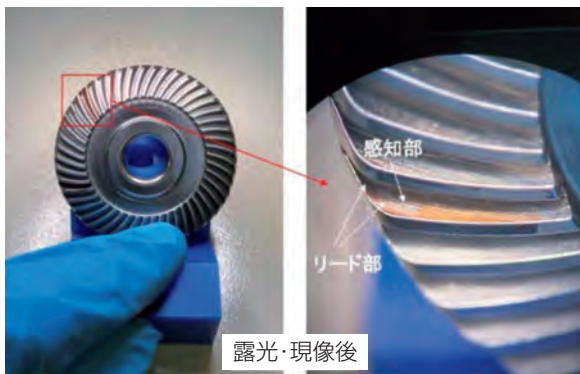


図29. 特殊形状歯車へのセンサ蒸着 1

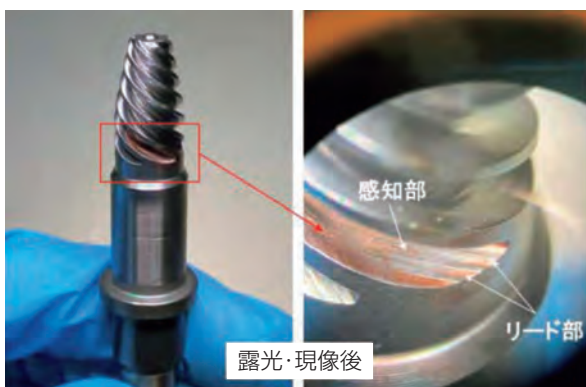


図30. 特殊形状歯車へのセンサ蒸着2

## 参考文献

- 1) Michiyasu Owashi and Yuji Mihara “Measurement of Contact Pressure Distribution between Gear Teeth Using a Thin-film Sensor”, International Tribology Conference, Hiroshima 2011 October 30 – November 3, 2011, Hiroshima, Japan
- 2) Akira Kurasako, Michiyasu Owashi, Yoshihiro Sakai, Yuji Mihara, Hiroshi Ohue, “Measurement of Contact Pressure Distribution between Spur Gear Teeth using Multi-point Thin-film Sensor”, International Conference of Business and Industrial Research 2012
- 3) Takumi Iwata, Masakuni Oikawa, Michiyasu Owashi, Yuji Mihara, Keisuke Ito, Yoshinari Ninomiya, Yohei Kato and Shinya Kubota, “The Verification of Engine Analysis Model Accuracy by Measuring Oil Film Pressure in the Main Bearings of a Motorcycle High-Speed Engine Using a Thin-Film Sensor”, Lubricants 2022, 10, 314. <https://doi.org/10.3390/lubricants10110314>

## 用語解説

\*1 東京都市大学

学校法人五島育英会の登録商標です。

## 11. 謝辞

いまだ開発途中であるが今回の開発は東京都市大学抜きには進めることができなかった。東京都市大学の三原教授と株式会社モトラの尾鷲氏には非常に感謝している。この場を借りてお礼申し上げたい。

# コンベヤチェーン組立治具ロケーション管理システムの構築

Construction of a Conveyor Chain Assembly Jig Location Management System

青木 隆幸<sup>\*1</sup>  
Takayuki AOKI

コンベヤチェーンの製造において、多品種少量生産が一般的であり品種は年々増加している。これにより治具の種類も増加し、実務経験が浅い作業者によっては使用頻度が低い品種の組立時に治具の保管場所や使用方法がわからない状況に陥る。これらの問題に対応するため、今回、製造現場とのPoC<sup>\*1</sup>およびコミュニケーションを通じ、現場作業員がタブレットを用いてバーコードをスキャンすることで、品種切替時に必要となる治具一式とその保管場所等の情報にアクセスできるシステムを構築した。現在、先行している2つの作業班で運用しており、年間160時間の工数削減につながられたため、その活動内容を報告する。

In the manufacturing of conveyor chains, the production of multiple types in small lots has become the norm and the number of different products produced is increasing year by year. This has led to an increase in the different types of jig used and a situation where the less experienced workers do not know the storage locations for the jigs used for the assembly of infrequently used products, or how to use those jigs. To address these issues, we implemented PoC<sup>\*2</sup> and communication with the manufacturing workplaces and built a system that enables the on-site workers to use a tablet to scan barcodes and access information such as the set of jigs required when changing between product types, and the storage locations of those jigs. This system is currently being used by the first two work groups and has led to man-hour savings of 160 hours per year, so this is a report of the details of those activities.

## 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国際的な競争力を保つうえ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、製造現場にて品種切替に伴う頻繁な段取り作業が発生しており、生産性向上を妨げる要因の一つとなっている。当社のコンベヤチェーン組立工程では、これまで現場による改善活動・標準化活動を行ってきたが、拡大する品種量および生産に必要となる治具や手順等の組み合わせの複雑化により、作業員ごとの経験の「ムラ」があり、治具を探す「ムダ」を抑えることが難しく、思うような生産性の向上を図れていなかった。

このような問題に対し、筆者はデジタル技術を用いて製造現場と一体となり解決策を進めてきた。以下にその内容を報告する。

## 2. 製造現場課題とDXによる対策

### 2.1 コンベヤチェーン組立工程での治具管理の課題

コンベヤチェーンの組立工程では、搬送物の特性や用途に応じて多様な仕様が求められることから特注品の割合が多く、結果として多品種少量生産となる。そのため、品種ごとに必要な治具が増加し、管理が煩雑化してしまう。煩雑化を防止すべく、現場では「定位・定品・定量」の3定活動<sup>\*2</sup>を通じた改善に取り組んでいるが、治具の種類が膨大になる中、品種に応じて必要となる治具の組み合わせや作業手順や注意点も異なる。これらを作業班長にて情報を明文化しているが、作業班員全員へタイムリーに展開するのは困難（ムリ）であり、経験や習熟度による治具探索のばらつき（ムラ）が発生する。さらに、Excel<sup>\*3</sup>等による管理では最新の所在や共用状況の把握が難しく、所在不明や使用方法不明が生まれ、段取り時間の長期化や納期遅延リスクが高まっている。これらは3M（ムリ・ムダ・ムラ）<sup>\*4</sup>の典型例であり、生産性向上を阻害することになる。また、技能や知見がべ

※1 DX・IT・研究開発センター DX技術開発部

テランに依存する技能伝承の停滞や、治具の誤廃棄による組立停止と治具の増加も課題となる。これらの問題点をまとめると以下ようになる。

[課題のまとめ]

- 品種増加に伴う治具の増加による管理の煩雑化
- 誤廃棄リスクによる組立停止と治具保管量の増加
- 経験差による治具探索時間のばらつきと情報取得の困難さ
- 技能伝承の停滞とベテラン依存の構造

## 2.2 DXアプリによる対策

コンベヤチェーン組立工程における治具管理の課題に対処するため、カメラ付きタブレットとバーコードリーダーを活用した治具ロケーション管理アプリを開発した。まず、治具の種類ごとに保管位置や写真等の情報を Web アプリのデータベースに登録する。生産時には、バーコードリーダーで品種情報を読み取り、対応する治具情報をタブレットに表示することで、必要な治具を迅速に特定・準備できる。さらに、治具の使用履歴や最終使用日を記録することで、適切な廃棄時期の判断が可能となる。本 DX アプリにより、治具管理の効率化と段取り時間の短縮が期待される。アプリの全体構成図 (図1 参照)、ハードウェア構成、ソフトウェア構成を以下に示す。

【ハードウェア】

- ・クライアント用タブレット
- ・無線式バーコードリーダー
- ・治具ロケーション管理アプリ用サーバー

【ソフトウェア】

- ・Web サーバー (Nginx \*<sup>5</sup>)
- ・リレーショナルデータベース (PostgreSQL \*<sup>6</sup>)
- ・メッセージキュー (RabbitMQ \*<sup>7</sup>)
- ・Web スクレイピング\*<sup>8</sup> (Playwright \*<sup>9</sup>)
- ・治具ロケーション管理アプリ (内製ソフトウェア)



図1. 全体構成図

バーコードリーダーの機能をタブレット内蔵カメラとソフトウェアで代用することも検討したが、ハードウェアのほうが複数のバーコードが印字される紙面上での読取り易さ、タブレット内蔵カメラの手ブレ、取り回し易さ、信頼性の高さ等の検証結果からハードウェアのバーコードリーダーを採用した。ソフトウェアについては低コストかつ現場課題の解決に注力する観点から、OSS (Open Source Software) のミドルウェア\*<sup>10</sup>やフレームワーク\*<sup>11</sup>、ライブラリ\*<sup>12</sup>等を採用している。

## 3. DXアプリの紹介

次に、具体的に製作したアプリの概要を紹介する。本アプリは、ユーザーの直接的なフィードバックを基に設計しており、実際のタブレットを用いた操作性やインターフェースにも意見を出し合い、現場での使いやすさを重視した。なお DX アプリの導入に伴い、治具情報および品種切替えに付随する作業情報の登録が必要になることから、現場担当側で「治具名および治具位置情報の命名規則の標準化」、「治具用棚の配置に伴うレイアウト見直し」、「複数品種で使用する共用治具の紐づけ対応方法」、「図面/手順書等の既存システムに存在する情報の登録方法」等の運用対応をさせていただいている。DX アプリの導入後では、必要な情報が集約・紐づけされ、必要なときに引き出すことができるため、次図のように作業性が向上する (図2、図3 参照)。本アプリの機能を以下にて紹介する。

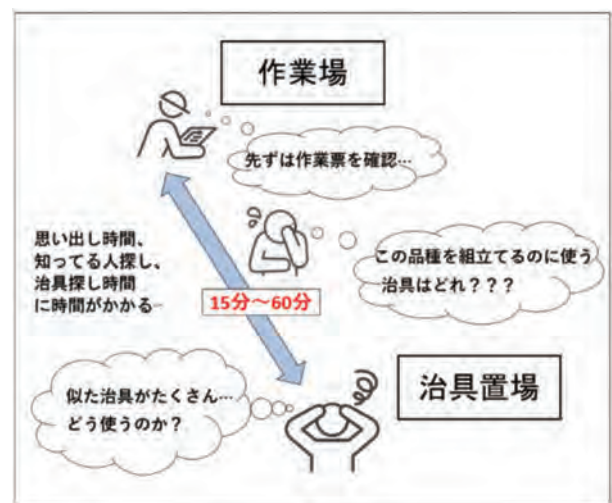


図2. DX アプリ導入前

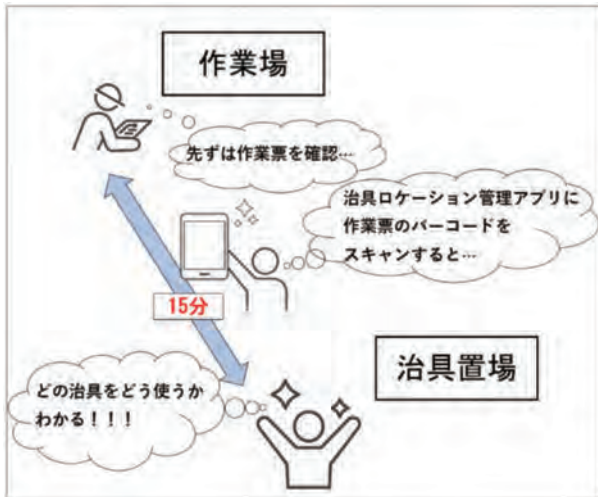


図3. DX アプリ導入後

### 3.1 治具検索機能

作業票に記載されているオーダー No をバーコードリーダーで読み取ると、オーダーに紐づく品種に対して登録されている治具情報の一覧を表示できる。治具情報として、治具名、治具の位置情報、写真等が表示できる。また、複数治具情報の表示だけでなく治具の組付け写真情報、作業手順書、安全・品質に関する情報等を登録・表示することができ、本画面にて品種切替え時に必要となる情報を集約している (図4、図5参照)。経験が浅く位置情報がわからない作業者の場合はマップ情報を参照することで確実に必要な治具へたどりつくことができる (図6参照)。

図4. オーダー入力画面

画像	治具名	位置	属性	メモ
	C2【特ピン押え治具】 AN 01	AAM-C-1-左	✓	
	D6【トクピン置き】 AN 01	AAM-D-1-右	✓	
	E3【カナグ組立特殊治具】 AN 01	AAM-E-2-右	✓	
	K09【キー取付治具】 AN 01	AAM-A-1-右	✓	

図5. 治具検索画面



図6. 治具位置マップ情報

また、オーダー読み取り時に治具が登録されていない場合は、本画面から「3.2 治具情報の登録・編集機能」の画面へと品種情報を持ちながら遷移することで、治具の登録と品種紐づけを同時に行うことができる。

### 3.2 治具情報の登録・編集機能

品種の増加に伴い手配が必要となる治具の登録を簡単に行えるようほとんどの項目をプルダウンから選択することができる。また、治具本体の写真も登録することができ、タブレットのカメラから撮影および登録をシームレスに行えるよう工夫している (図7、図8参照)。また、選択項目を別の画面や設定ファイルを編集することで変更することも可能であり、他工程での展開等にも対応できるよう準備している。品種に紐づけずに治具単独で先行して登録することも可能であるが、後から品種と紐づけるには後述の「3.3 治具紐づけ機能」の画面を使用する。

図7. 治具情報登録・編集画面 (プルダウン選択)



図8. 治具情報登録・編集画面（治具写真登録）



図10. 治具情報メンテナンス画面

### 3.3 治具紐づけ機能

複数の品種で共用して使用する治具等を紐づける場合、あるいは間違って品種の紐づけ登録を行ってしまった治具の紐づけを解除する場合に使用する。通常、治具名は覚えることが難しいため、棚名称等の治具置き場から検索を行い該当する治具を容易に探し出し紐づけ・解除することができる（図9参照）。

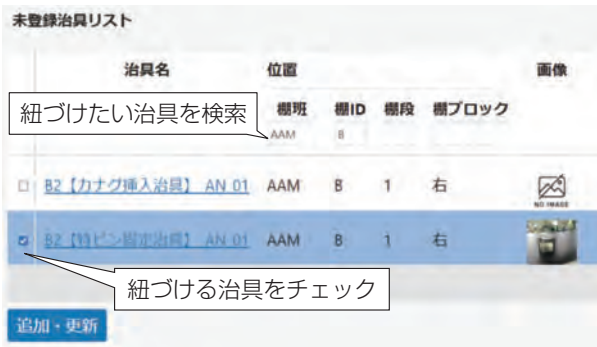


図9. 治具紐づけ画面

### 3.4 治具情報メンテナンス機能

日々の品種切替え時に治具情報の登録や検索を行うが、現場での改善活動として治具等の置き場所標準化が行われる。「3.3 治具紐づけ機能」と同様に棚名称等から検索を行い該当する治具を探し、治具の位置情報等を「3.2治具情報の登録・編集機能」にて編集することができる（図10参照）。

### 3.5 既存システムとの連携機能

作業手順書等の情報は既存システムに登録することでノウハウを蓄積しているが、実際の製造現場近辺ではうまく活用できていなかった。作業手順書は品種と紐づいておらず、呼び出しには登録者のほか、工程の有識者でないと検索が難しいことが理由にあげられる。本アプリは品種と治具を紐づけるが、品種に作業手順書や図面も紐づけることができ、治具検索画面にて別システムで登録済みのPDFについてWebスクレイピングを経由して閲覧することができる。また、バーコードリーダーで作業票に記載されているオーダーNoを読み取るが、このオーダー情報に紐づく品種については既存生産管理システムとの異種データベース間の連携を行うことで、ユーザーの入力やシステム側でのCSVデータの読取り等を省く工夫をしている。

### 3.6 治具廃棄期限管理機能

治具の廃棄について、2年や5年等の標準的な期限が存在しているが、増え続ける治具に対しての各々の手配日や最終使用日について管理することが難しい状況にある。本アプリでは治具の新規登録日や最終使用日を保持しており、廃棄期限を過ぎた治具についてはアプリのトップ画面等に表示している（図11参照）。現状は別画面にて、廃棄を行うことができるが、治具を手配する製造技術担当との連絡方法等については検討中となる。

期限切れ治具情報			
治具名	最終使用日	期限(年)	判定日
22042214004_AP_01	2024-11-07	0.1	2024/12/07
CF800.1477_AP_02	2024-11-07	0.1	2024/12/07
22042214004_AP_09	2021-12-27	2.0	2023/12/27

図11. 治具廃棄期限管理機能

## 4. 改善効果

DX アプリを導入し、治具情報や作業手順書のデジタル化を進めた。結果として、情報の一元管理と必要ときに必要な情報の共有が可能となり、下記の定量効果・定性効果につなげることができた。

### 4.1 定量効果

本アプリの導入が先行している2つの作業班において2週間調査した結果、年間換算するとおおよそ160時間の削減効果となる。なお本効果は治具3定活動のうえで創出される治具探しの効率化によるもので、それ以外の効果については定量化が難しく、以下の定性効果として表現する。

### 4.2 定性効果

定量効果のように現状では算出が難しい効果として定性効果が多数存在する。中には安全・品質・納期・ノウハウに関するものもあり、算出可能な定量効果以上の効果を感じていただいている。大きくは以下の2点となる。

#### 4.2.1 作業前必要情報の集約と共有

安全/品質面等の注意点について組立作業前の品種切替時に確認ができる。工程に不慣れな新人や異動者であっても治具探しだけでなく安全/品質等の注意点の技能ノウハウが共有され、細かいフォロー工数も低減される。また、すでに存在する当社の製造情報システムに図面、作業手順書、コツを文書化したワンポイント情報等を登録しているが、品種によりどの情報が必要となるか、また改定版の情報抽出等の手間が発生していた。本アプリとのシステム間の連携を行うことで、図面や手順書のIDを紐づけることで常に最新版を呼び出すことができることで、技能伝承および作業班長に負担がかかる3M（ムリ・ムラ・ムダ）を軽減することができる。

#### 4.2.2 治具の存在確認と廃棄管理

数年ぶりに製造する品種の場合、必要となる治具が廃棄されている可能性がある。治具が存在しない状況で組立工程に部品が到着すると、納期を遵守することができずユーザーの信頼を損なう危険がある。また、治具を設計・手配する製造技術担当と製造担当間での必要治具の存在確認工数も発生する。本アプリを使用することで、治具の存在確認のコミュニケーションコスト低減および治具の廃棄期限管理と治具管理スペースの抑制を図ることができる。

上述の定量・定性効果は、システム単体で効果につなげることは難しく、3章での3定活動・標準化活動に

よる日々の改善が土台となりシステム導入による効果につながっている。

## 5. 今後の展開と課題

今回構築したDXアプリの導入は先行している2つの作業班となっている。他班への展開および他工程へと展開することでさらなる定量/定性効果の刈取りが期待できる。特に部品成形工程の一部ではすでにトライアルに入っている。一方で課題も存在する。DX部門の現場への理解はすぐに深まるものではないと実感した。また、すでに導入されている生産管理システム等との棲み分けや連携等、システム構築の知見だけでなく、周辺システムの理解も必要となる。その他、タブレットやバーコードリーダー等便利なハードウェアが安価で手軽に入手できるようになってきているが、導入台数増加にともなう初期セットアップ作業やタブレットの機種による画面サイズ・解像度の違いについて等、通常のWebシステム開発では深く気にしないことについても考慮が必要となることが分かった。また、本DXアプリはアナログ情報のデジタル化、一元管理、他システム連携を行っているが組立工程内の業務プロセスにおける一部変革にとどまっている。工程全体あるいは各工程間を含めたチェーン製造プロセスの全体最適を意識したDXを進めたいと考える。

## 6. おわりに

本件に関して、他作業班/他工程への横展開や機能改善等、実行する内容が残っているが当社のモノづくりDXにおいて成果が得られた内容に関して報告した。当初は「治具を探す時間」の削減のみフォーカスしていた。治具探しは「品種切替え」作業の一部であり、この作業に伴い必要となる情報は多岐に渡ることが分かり、開発要件を必要十分な範囲へと広げることで作業工程の変革につなげることができた。DX部門におけるシステムの知見だけでは困難であったが、製造現場の知見や現場担当側でのアプリ導入の強いモチベーションと協力を得ることができ実現することができた。本件の構想から参画し、現場の運用見直し等に協力いただいた当社製造部CC組立課に感謝し、今後もDX部門と製造部門で一体となり、当社のモノづくりDX活動を推進・加速していきたいと考える。

## 用語解説

### \*1 PoC

Proof of Concept の略。概念検証を指す。

### \*2 3定活動

製造現場における整頓の基本であり、「定位」「定品」「定量」の3つを表す。「定位」は物の置き場所を定めること、「定品」は置く物を明確にすること、「定量」は適切な数量を設定することを指す。探すムダの削減や作業効率の向上、物の適正管理、紛失防止につながる。

### \*3 Excel

Microsoft Corporation の登録商標

### \*4 3M (ムリ・ムダ・ムラ)

「ムリ」は作業や設備に対して過剰な負荷をかける状態で、疲労や故障の原因となり、「ムダ」は付加価値を生まない不要な作業や時間、資源の浪費となり、「ムラ」は作業のばらつきや不均一性を意味し、各々生産性や品質の低下につながる。

### \*5 Nginx

Nginx Inc. によって開発・保守されているオープンソースの Web サーバアプリケーション。本稿内の活動でも Web サーバー、リバースプロキシ、TLS/SSL 等の機能で使用している。

### \*6 PostgreSQL

PostgreSQL Global Development Group によって開発・保守されているオープンソースのリレーショナルデータベース管理システム。高い拡張性と SQL 標準への準拠を特長とし、Web アプリケーションをはじめ多様な用途で活用されている。商用データベースに匹敵する性能と信頼性を備える。

### \*7 RabbitMQ

Broadcom Inc. によって開発・保守されているオープンソースのメッセージブローカー。本稿内の活動では非同期バックグラウンド処理および既存システムへの負荷平準化のため同時実行数制御に使用している。

### \*8 Web スクレイピング

ウェブサイトから必要な情報を自動的に抽出し、構造化された形式でデータ収集する技術。手作業よりも高速かつ正確に取得でき、価格調査や競合分析、ニュース収集等さまざまな業務で活用される。

### \*9 Playwright

Microsoft Corporation によって開発・保守されているオープンソースのブラウザ自動化フレームワーク。主要なブラウザを自動化し、エンドツーエンドテストや Web スクレイピングを効率的に実行することができる。本稿内での活動では Web スクレイピングにより既存システムのデータ取得に使用している。

### \*10 ミドルウェア

アプリケーション開発の際に必要な基本構造や処理の枠組みを提供するソフトウェアを指す。開発者は定義された全体構造や流れに沿って、コードを追加するだけで、例えばデータベース接続、画面表示等の共通機能を自前で構築せずに済み、短期間で信頼性の高いシステムを実現できる。

### \*11 フレームワーク

アプリケーション開発の際に必要な基本構造や処理の枠組みを提供するソフトウェアを指す。開発者はその土台に沿ってコードを追加するだけで、例えばデータベース接続、画面表示等の共通機能を自前で構築せずに済み、短期間で信頼性の高いシステムを実現できる。

### \*12 ライブラリ

アプリケーション開発者が必要な機能呼び出して使う部品の集まり。文字列操作やデータベース接続等、得意分野の処理の1

つに特化しており、開発者が適宜呼び出し可能な便利工具として利用できる。フレームワークと異なり全体構造や流れに沿ってコードを記述する必要はない。

# Dr.チェーン®の開発

Development of Dr. Chain Diagnosis System for Chain Conveyors

大西 智彦<sup>※1</sup>  
Tomohiko ONISHI

森村 武史<sup>※1</sup>  
Takeshi MORIMURA

水野 優希<sup>※1</sup>  
Yuki MIZUNO

大橋 哲也<sup>※2</sup>  
Tetsuya OHASHI

津田 晃義<sup>※3</sup>  
Akiyoshi TSUDA

チェーンコンベヤの保守・メンテナンスにおいて、メンテナンス基準の曖昧さと不具合時の要因特定が困難であるという二つの課題がある。これらの課題を解決するために、計測技術とクラウド分析を統合したチェーンコンベヤ状態診断システム Dr. チェーンを開発した。

また、実際の生産設備でフィールドテストを行い、チェーン伸び率や速度変動を可視化し、メンテナンス基準の明確化と不具合原因の推定が可能であることを確認した。

Two major issues in the maintenance of chain conveyors are ambiguity in the maintenance standards and the difficulty of identifying the causes of failures. In order to solve these problems, we developed the Dr. Chain diagnosis system for the condition of chain conveyors by integrating measurement technology with cloud-based analysis.

We also conducted field tests on actual production facilities and confirmed that it is possible to visualize the chain elongation rate and speed fluctuations to clarify maintenance standards and estimate the probable causes of failure.

## 1. はじめに

日本の製造業は近年、深刻な人口減少と高齢化の影響を受け、働き手の不足が顕在化している。特に製造現場では、長年にわたり現場を支えてきたベテラン社員の引退が進み、これまで蓄積されてきた熟練のノウハウを次世代に十分継承できていないという課題がある。また、設備の安定稼働を支えるメンテナンス分野においても人手不足が深刻化しており、限られた人員で効率的な保全活動を行うことが求められている。

このような背景の中、従来の「カン・コツ<sup>※1</sup>」に依存した保全作業から脱却し、誰でも一定の品質で作業ができる環境を整えることが急務となっている。本報告では、これらの課題を解決するために開発した、チェーンコンベヤの状態を可視化し、メンテナンス業務を支援する Dr. チェーンの概要とフィールドテストの結果について報告する。

## 2. チェーンコンベヤユーザーの課題

開発にあたり、チェーンコンベヤを使用するユーザーが日々の保守・メンテナンス作業において直面している課題を把握するため、現場でヒアリングを行った。その結果、多くのユーザーがチェーンコンベヤの保守・メンテナンスに関して共通する二つの課題を抱えていることが分かった。

一つ目の課題は、チェーンの適切なメンテナンスや交換基準を設定できていないというものである。現状は適切な基準を設定できるノウハウがなく、前任者が暫定的に決めた方法で管理を継続している等、担当者のカン・コツに頼った曖昧な基準となっている。

二つ目の課題は、チェーンコンベヤの不調時の要因特定が難しいことである。要因特定が難しい理由は、可動部である回転部やチェーンは安全カバーで覆われていることが多く、カバーを外さなければ点検ができないことに加え、チェーンコンベヤは機長が数m～数10mのものも多く、確認すべき範囲が広いことがある。また正常時の動作音自体が大きいため、音による不具合箇所特定が難しくなってしまう。その結果、カン・コツに頼った場当たり的な対応になり、無駄なメンテナンス、交換作業が増えてしまうという声が多くあった。

※1 DX・IT・研究開発センター DX技術開発部

※2 パワトラ事業統括 商品企画部

※3 新事業開発センター サービス事業開発部

以上のような課題を踏まえ、次章ではそれらを解決するために開発した Dr. チェーンの構成と特徴について述べる。

## 3. Dr.チェーンとは

### 3.1 Dr.チェーンの概要

Dr. チェーンは、チェーンコンベヤに特化したデータ収集、蓄積、分析サービスである。Dr. チェーンは設備に常設し、運転時のデータを自動で収集、蓄積していく。Dr. チェーンの概要を図1に示す。Dr. チェーンは、チェーンコンベヤ計測システムとクラウドサービスの二つの構成要素から成り立っている。

チェーンコンベヤ計測システムは、チェーンコンベヤに関する専門的な計測ノウハウを元に、各種計測器からチェーンコンベヤの運転データを収集する。

クラウドサービスは、計測したデータをクラウド上に蓄積し、データの分析や通知を行うものである。これにより、ユーザーは設備に計測器を設置するだけで、計測データの収集、蓄積、分析環境を整えることが可能となる。また、クラウド上のデータを当社と共有することで、当社側からデータを元にした専門的な知見やアドバイスを提供することが可能となる。

### 3.2 チェーンコンベヤ計測システム

#### 3.2.1 概要

チェーンコンベヤ計測システムは、チェーンコンベヤの情報を取得するセンサ（詳細は3.2.2項に記載）と、センサで計測した各種データを収集・保存するデータロガー、計測したデータをクラウドへ送信するゲートウェイ（GW）で構成されている。

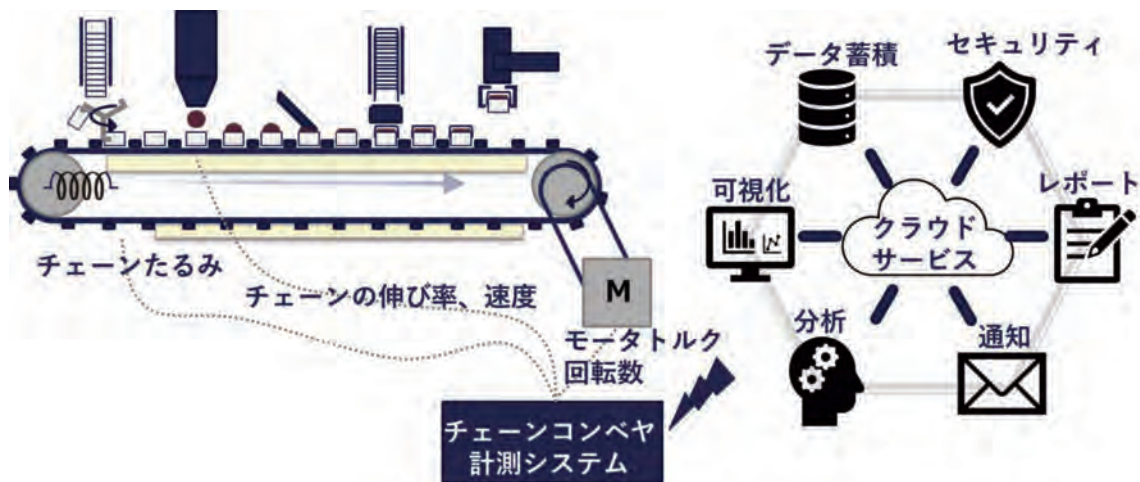


図1. Dr.チェーンの概要

#### 3.2.2 センサ

チェーンコンベヤの計測システムでは、設備や課題に応じてセンサを選定し取り付けます。主な計測項目を以下①～④に示す。

##### ①チェーンの伸び率

専用のチェーン伸び計測器（図2）を用いて全リンクにわたるチェーンの伸び率を計測する。伸び率の傾向や伸びによる寿命の判断に用いる。

##### ②チェーンの速度

チェーンの速度を測定し、チェーンコンベヤの状態推定に用いる。

##### ③チェーンのたるみ

チェーンのたるみ具合を検知し、保守のタイミングを予測する。

##### ④モータ情報

トルク、回転数、電流等、モータの動作データを収集し、動作履歴を残すとともに、チェーンコンベヤの状態推定に用いる。

#### 3.2.3 製作した計測システム

製作したチェーンコンベヤ計測システムの本体（試作機）を図3に示す。製作したチェーンコンベヤ計測システム

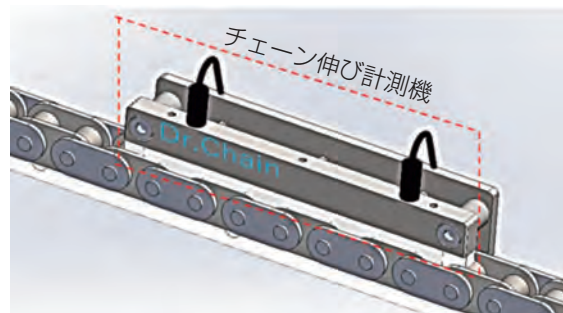


図2. チェーン伸び計測器

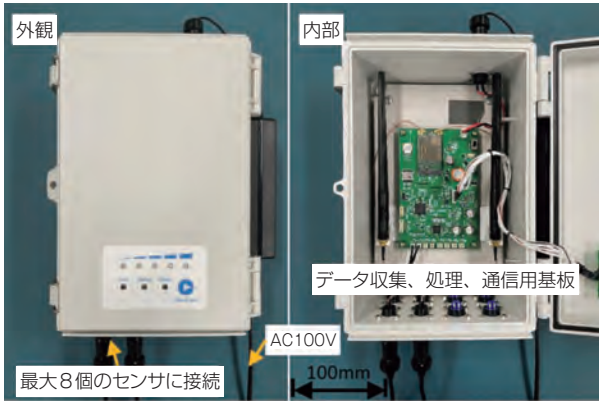


図3. チェーンコンベヤ計測システム本体（試作機）

ムは、8chのアナログ電圧を収集できる仕様になっており、計測したデータを3G、LTE方式の回線を利用してクラウドへ送信する。計測タイミングは外部トリガか、定時、一定時間間隔のいずれかを選択できる仕様となっている。

### 3.3 クラウドサービス

クラウドの概略構成を図4に示す。現在の構成は、チェーンコンベヤ計測システムで計測したデータを、SORACOM<sup>\*2</sup>の通信回線を利用し、AWS<sup>\*3</sup>に送信している。AWS上では送信されたデータの蓄積、分析、可視化、通知を行う構成となっている。クラウド上のダッシュボード<sup>\*4</sup>では、チェーンの伸び率の推移や、チェーンの速度変動等の重要なデータを一目で確認できる。また、設定した閾値を超えた場合に、登録したメールアドレスにアラートを送信できる。

### 3.4 Dr. チェーンの特徴と従来製品との違い

近年、設備保全の効率化や高度化のニーズの高まりを背景に、多くのメンテナンス支援や設備状態監視を目的とした製品・サービスが市場で提供されている。これらの一般的な製品の多くは、多様な設備に対応する汎用的な構成であり、計測項目も限定的であることが多い。主に基本的な異常の有無を検知し、状態の可視化やアラート通知等の機能を提供している。

一方、Dr. チェーンは、チェーンコンベヤ専用設計された状態診断システムであり、以下のような特徴を備えている。

- ・専用センサによる高精度計測：チェーンの伸び率、速度変動、たるみ、さらにはモータのトルクや電流といった、チェーンコンベヤの保守判断に有効な情報を網羅的に収集可能である
- ・クラウド連携による一貫した運用：計測データはクラウド上に自動蓄積され、可視化・分析・異常通知までを一体で提供可能である
- ・専門ノウハウに基づく診断支援：当社が長年培ってきたチェーンコンベヤに関する知見を活用し、異常検知にとどまらず、その要因や発生位置の推定まで踏み込んだ診断支援を実現することを目指している

このように、Dr. チェーンは、一般的な設備監視製品とは異なり、チェーンコンベヤに特化した機能構成と専門知見に基づく高度な保全支援を、特徴としており、今後の製品化に向けて実証・検証を進めている段階にある。

次章では、開発中の本システムを実際の生産現場に適用し、その有効性を確認したフィールドテストの結果について紹介する。

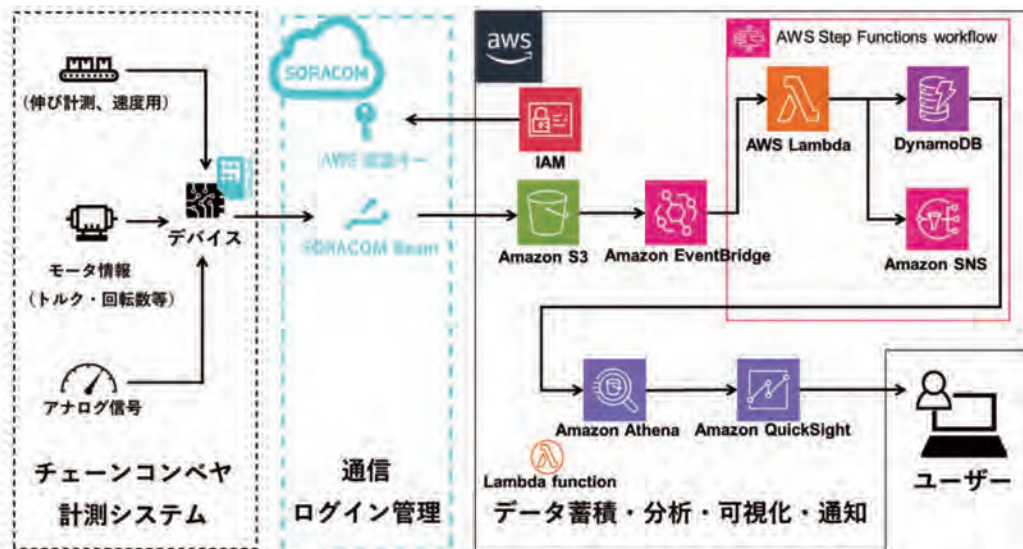


図4. クラウド概略構成

## 4. フィールドテスト

現在、実ラインでフィールドテストを行っており、ここでは、その一例を紹介する。

### 4.1 対象設備詳細

対象設備の概略図を図5に示す。対象設備は、チェーンコンベヤを利用して容器を搬送し、内容物の充填やシール処理を行う工程で使用されている。運転条件は、連続運転でチェーン速度40~50m/min、チェーンはRF2060-LSK、リンク数は200~300L程度、駆動・従動スプロケットの歯数は12である。

### 4.2 ユーザーの課題、要望

フィールドテスト前に対象設備の課題や Dr. チェーンへの要望についてヒアリングを実施した。その結果、主要な課題、要望は以下の3点であった。

#### ①チェーン伸び率把握とメンテナンス基準設定

チェーンが伸びると、調整した位置から搬送物がずれるため、チェーンコンベヤに容器が乗らない、充填位置がずれる、シールがずれる等の不具合が生じ、チョコ停(突発停止)が多発する。そのため、チェーン伸び率を定量的に把握し、メンテナンス基準の参考にしたい。

#### ②不具合時の要因の推定

設備は調整できる箇所が多い。そのため、不具合の要因はチェーンの伸びだけでなく、複数のものが考えられる。現状では、不具合時に何が要因か切り分けできておらず、担当者のカン・コツでメンテナンスをしているため、原因が特定できないチョコ停が多発している。Dr. チェーンで少しでもそれらの要因を可視化してほしい。

#### ③計測の自動化

チェーンのアタッチメントの構造によりチェーンの伸び率を簡単に計測できない。またチェーンの測長や点検は、点検口から手が届く数カ所しかできておらず、全リンクの計測ができていない。そのため、伸び率の

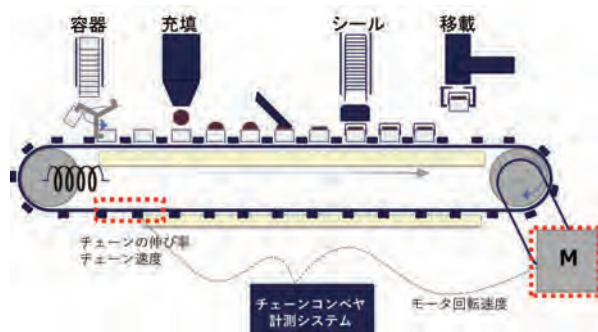


図5. 対象設備の概略

計測を自動化し全リンクの計測を行いたい。

フィールドテストでは、Dr. チェーンを適用し、これらの課題に対して有効なアプローチが可能であるかを検証した。

### 4.3 フィールドテストでの計測項目

主要な課題に、搬送物の位置ずれがあったことから、位置ずれにつながる可能性がある下記の3点を、チェーンコンベヤ計測システムを用いてセンシングした。

- ・チェーン全リンクの伸び率
- ・チェーンの速度
- ・モータ回転速度

また、これらの計測データをもとに不具合時の要因と位置の推定ができるかを検証する。

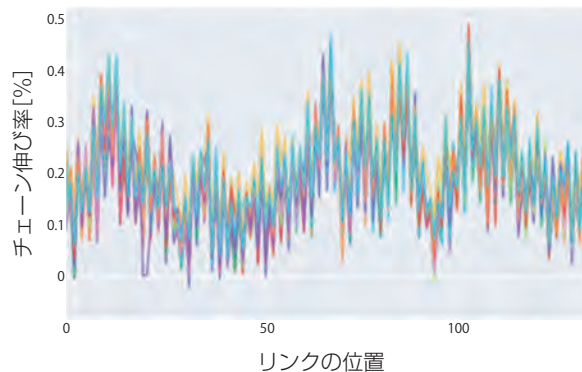
### 4.4 データ分析結果

Dr. チェーンを用いた計測結果と分析結果を以下に示す。

#### 4.4.1 チェーン全リンクの伸び率

チェーン伸び計測器でチェーンの全リンクの伸び率の傾向を測定した。計測したチェーンの全リンクの伸び率の傾向を図6(a)に示す。図6(a)から、計測対象のチェーンは均等に伸びが進行しておらず、同じチェーン1周の中でも伸び率が大きい区間と、小さい区間があることが分かった。

(a) チェーン全リンクの伸び率の傾向



(b) チェーン速度

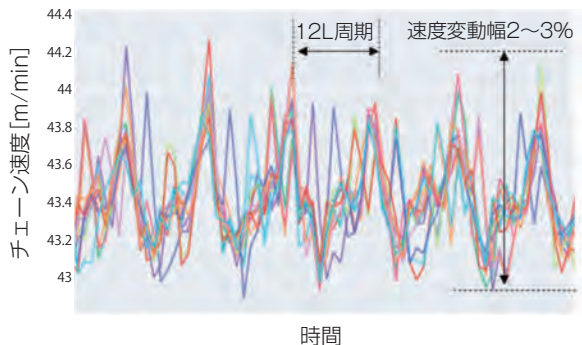


図6. 計測結果

この伸び率の偏りが、位置ずれの要因になっている可能性がある。図7に示すように、基準からシール位置が50リンクの距離にあり、伸び率が大きな区間と小さな区間の伸び率（平均）の差を0.15%とした場合、シール位置に約3mm程度（ピッチ38.1mm×50リンク×0.0015≒3mm）のずれが生じると推定できる。

※シール位置は±5mm以上ずれると、画像検査で不良判定が出る。

#### 4.4.2 チェーン速度変動

Dr. チェーンで計測したチェーンの速度を図6(b)に示す。チェーンの速度は2~3%程度の幅で変動しており、チェーン12リンクごとに周期性があることが分かった。

図6(b)の速度変動を簡易的に示したものを図8に示す。速度変動が図8に示したものであると仮定して、位置ずれがどの程度生じているかを算出した。その結果、速度が遅いタイミングと早いタイミングでは4mm程度（速度変動幅25mm/s×0.32s×1/2≒4mm）のずれが生じていると推定できる。

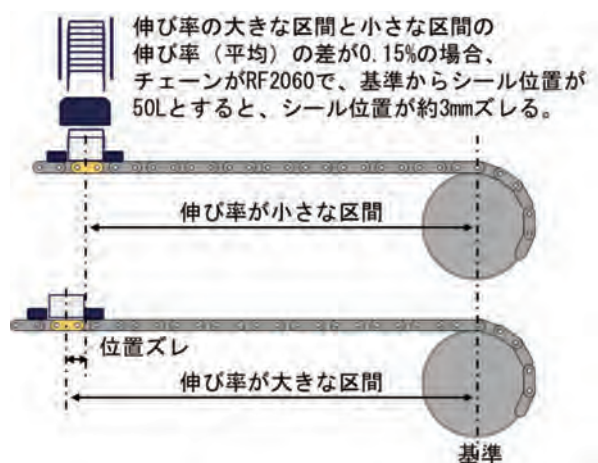


図7. 伸び率の偏りによる位置ずれ

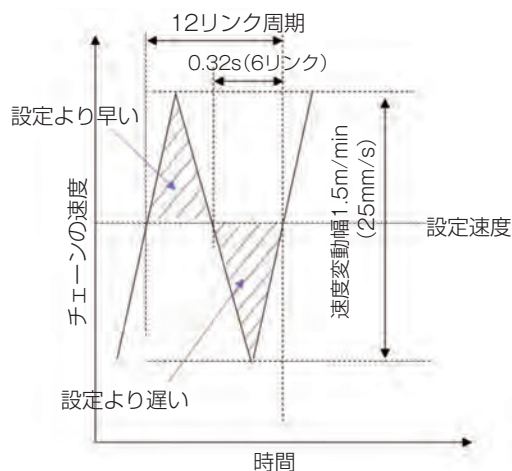


図8. 簡易的に示した速度変動

#### 4.4.3 モータ回転速度

Dr. チェーンで計測したモータ回転速度はほぼ一定で、モータは設定通りの動きをしていた。そのため、図6(b)のチェーン速度の変動は、モータが要因となる速度変動ではないことが確認できた。

#### 4.4.4 不具合箇所の推定

計測したモータ回転数はほぼ一定であるにもかかわらず、チェーンの速度が12リンク周期で変動していることが分かった。そのことから、モータの出力軸からチェーン間のどこかに速度変動の要因があると考えられる。チェーンの速度変動周期が12リンク周期であることと、駆動軸と従動軸のスプロケットの歯数が12であることから、どちらかの軸スプロケットに偏心や異常摩耗が生じている可能性が高いと推定した。

また、本節で示した推定結果に基づく点検により、従動側スプロケットのキーが大きく摩耗し、止めねじにまで損傷が及んでいることが確認された。スプロケット一式を交換したところ、速度変動は解消され、チョコ停の頻度も低下したとの報告を得ている。以上より、推定内容の妥当性および Dr. チェーンの有効性が実証されたものとする。

#### 4.5 フィールドテストの結果

フィールドテストを実施し、課題である「①チェーン伸び率の詳細把握とメンテ基準設定」「②不具合時の要因の推定」「③計測の自動化」に対してアプローチし以下のような成果を得た。

- ・ユーザーが把握できていない不具合の要因である、チェーンの全リンクにわたる伸び率の偏りや、チェーン速度の変動を、可視化することができた。
- ・推定した位置ずれ量は無視できない大きさであったことから、それらの計測値等を元にメンテナンス、交換基準の閾値を設定する方向でユーザーと擦り合わせを行っている。
- ・不具合の一因となっている可能性がある周期的な速度変動の原因とその箇所を推定し、設備の点検を行った結果、不具合箇所の発見と対策に繋げることができた。
- ・Dr. チェーンを用いて、チェーンの伸び率等を自動で計測・蓄積・可視化できる環境を提供した。

## 5. 今後の予定

今後は、クラウド上に蓄積された多様な設備環境下での運転データや異常データを詳細に分析することで、計測精度の向上を図るとともに、状態診断や予兆検知のアルゴリズムを一層高度化していく。また、計測・診断技

術だけでなく、使いやすさや運用性の向上を目的としたシステムインターフェースの改善や、ユーザーの運用形態に合わせたカスタマイズ機能の拡充等、実運用上の課題を解決するための取り組みも並行して推進する予定である。

現在、Dr. チェーンは試験導入段階にあり、限定的な環境下での評価や検証を進めている。この試験導入を通じて、すでにさまざまなご意見や要望が寄せられているため、それらを反映し、改良を繰り返しながらシステムの完成度を高めていく方針である。今後も引き続き、現場ニーズに即した改善を図る。

こうした技術的および運用上の課題への取り組みを着実に進めることで、近い将来、本システムを正式なサービスとして市場に提供することを目標としている。その際には、より広範な顧客層に対して導入しやすい仕組みや導入支援体制を整備することで、製造業全体におけるメンテナンスの高度化と効率化に貢献していくことを目指す。

## 参考文献

- 1) 山下光洋, 海老原寛之, AWS 認定クラウドプラクティショナー, SBクリエイティブ, 2019

## 用語解説

### \*1 カン・コツ

マニュアル化が難しく、熟練の技や非標準的な方法を指す言葉。特に製造業や手作業の現場で、経験や勘を頼り、明確な手順や数値が示されていない作業を指す。

### \*2 SORACOM

グローバルな IoT プラットフォームサービスを提供する企業。株式会社ソラコムに登録商標。

### \*3 AWS

Amazon.com, Inc. が提供するクラウドサービスの総称で、100以上の豊富なサービスを提供している。

AWS、Amazon Web Services、Amazon Athena、AWS Lambda、Amazon QuickSight、Amazon SNS、DynamoDB は、Amazon.com, Inc. の登録商標

### \*4 ダッシュボード

さまざまなデータや分析結果を視覚的に分かりやすく一目で確認できるようにするツールや画面。