

# 冷間鍛造成形品の不具合改善例

Instance of Improvements to Defects on Cold Forged Products

前田 哲宏<sup>\*1</sup>  
Akihiro MAEDA

冷間鍛造<sup>1)</sup>（以下冷鍛と記載）で成形すれば切削加工より精度は劣るものの、材料の歩留まりや時間当たりの出来高が良くなる場合が多くさまざまな部品の成形方法として採用されている。一方で冷鍛では鍛造工程由来の粗（アラ）が成形品に残る場合がある。今回は、冷鍛で発生した粗（アラ）を不具合としたその改善例を紹介する。

Although cold forged products are less precise than machined products, in many cases, they have better material yield and hourly output. Therefore, cold forging is used as a forming method for various parts. However, issues originating from the forging process may remain in cold forged products. This report introduces an instance of improvements to defects that occurred during cold forging.

## 1. はじめに

冷鍛では、圧造機と金型を用いて材料を塑性変形させることで目的の形状を得ている。一回の加工で目的の形状を得ることができれば良いが、複雑な形状や精度を確保するために数回の変形を経て目的の形状を得ることがほとんどである。この変形過程を鍛造工程と呼んでおり、鍛造工程設計が成形品の良し悪しに直結する肝となる<sup>2)</sup>。図1に鍛造工程例（簡略図）を示す。図1では切断した材料の上下面を加圧し平坦な状態に据込んだ後、上側から中心部を後方押し出すことで、コップの様な形状を得る工程を示している。

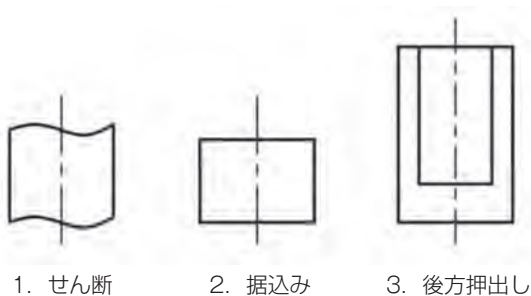


図1. 鍛造工程（簡略図）

## 2. 冷鍛成形品の粗（アラ）について

冷鍛成形品の粗（アラ）として、「キズ」「バリ」「凹み」「割れ」などがある。これらは材料そのものにあったものが、成形品に残ることで現れる場合（例：材料キズが成形品に残るなど）と、冷鍛の過程で発生する場合があります。必要に応じて、冷鍛後に仕上げ加工を行い除去することもある。冷鍛の過程で発生する粗（アラ）は、材料切断時のキズや無理な塑性変形、金型の不具合などが原因であり、部品としての品質（外観や強度）に悪影響を与えることはもちろん、安定した量産を妨げ、作業者のケガに繋がることもある。

## 3. 改善例紹介

本稿では、パイプ形状の冷鍛部品に発生していた「キズ」を不具合として改善した事例を紹介する。

### 3.1 改善対象部品（改善前）

改善対象とした冷鍛部品を図2に示す。



図2. 冷鍛部品（改善前）

※1 チェーン事業部 製造技術部

### 3.2 鍛造工程

図2で示した冷鍛部品の鍛造工程を図3に示す。

### 3.3 冷鍛部品に発生した「キズ」

図2で示した冷鍛部品の寸法は狙い通りに仕上がっていたが内径面取り部分に「キズ」が発生していた。(図4参照)

### 3.4 「キズ」の発生工程

通常、冷鍛部品で不具合が発生した場合は、原因を特定するために鍛造工程のどの段階でその不具合が発生しているかを調べる。今回は図3で示した各工程のサンプルを確認し、内径面取り部分のキズは「4. 前方押出し」の加工後に現れていることが分かった。図5に「4. 前方押出し」加工後の該当部分を示す。



図3. 改善対象品の鍛造工程 (簡略図)  
※「2から3」「3から4」「4から5」は反転している



図4. 冷鍛部品に発生したキズ (改善前)



図5. 前方押出し外観および内径面取りの「キズ」

続いて、なぜこの工程でこのような「キズ」が発生したのかを調査した。今回のように多くの工程を経る加工では、不具合が顕在化した工程そのものに問題がある場合と、前工程までに原因となる問題が発生している場合がある。今回は後者が該当した。

### 3.5 「キズ」の発生原因

3.3節で「キズ」が発生している工程が「4. 前方押出し」であることが分かった。しかし、金型破損も無いことから、一つ前の「3. 据込み2」の影響を疑った。この工程は、「4. 前方押出し」の深穴側を加工する金型の案内となる凹みを加工する工程である。図6に「3. 据込み2」後の外観を示す。

図6に示した「3. 据込み2」後のサンプルを反転させて「4. 前方押出し」の加工を行っている。よって「キズ」が発生しているのは図6写真の下面側である。下面側を観察してみると、円状に「バリ」が発生していることが確認できた。(図7参照) この「バリ」が「4. 前方押出し」で内径面取り部分へ移動し、図5の状態となり、最終的には図4のキズとなっていたのである。図8にバリ位置移動のイメージ図を示す。



図6. 据込み2加工後外観 (改善前)



図7. 据込み2加工後下面外観および「バリ」 (改善前)

図7で示した円状の「バリ」が発生する原因は「3. 据込み2」の金型の位置関係と隙間である。図9に「3. 据込み2」工程の金型略図を示す。

「3. 据込み2」では、金型A、B、Cで閉塞加工を行っている。この金型Bと金型Cの隙間や位置関係が図7の「バリ」発生に繋がっている。金型Cは成形品排出時に上側へ突き出す（摺動する）ため、この隙間をゼロにすることはできない。よって、「バリ」が発生したとしても成形品に影響が無い方法を検討する必要がある。

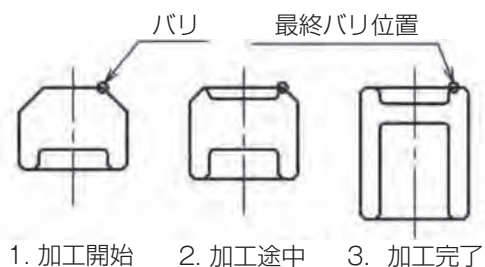


図8. バリ位置の移動（改善前イメージ図）

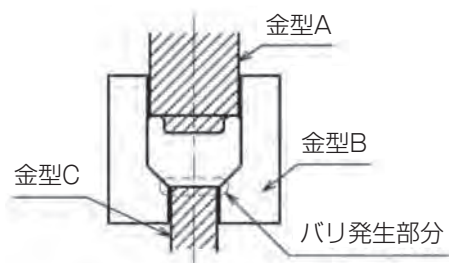


図9. 据込み2金型図

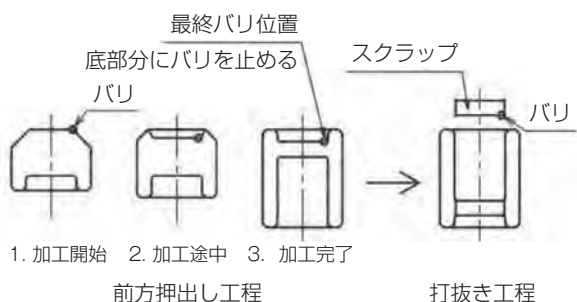


図10. バリ位置の移動（改善後イメージ図）

### 3.6 改善案の検討

「3. 据込み2」で発生した「バリ」が「4. 前方押し」で内径面取り部へ移動していることが分かったが、金型の構造上、問題となっている「3. 据込み2」の「バリ」を抑えることはできない。であればこの「バリ」が最終的に内径面取り部分に残るのを防げばよい。図3で示した鍛造工程を見ていただくと後工程に「5. 打抜き」があることが分かる。以上から改善案は下記とした。金型の形状変更で「3. 据込み2」で発生した「バリ」を「4. 前方押し」後、底部分に止めて「5. 打抜き」でスクラップとして排出とした。図10にイメージ図を示す。

### 3.7 改善対象部品（改善後）

改善実施後の冷鍛部品を図11図12に示す。

図12と図4を比較すれば改善によって「キズ」が無くなったことが分かる。また、金型の形状変更で「4. 前方押し」の最終バリ位置は底部分（打抜きでスクラップになる部分）になったことを図13に示す。



図11. 冷鍛部品（改善後）



図12. 内径面取り部分（改善後）



図13. 前方押し出し外観と最終バリ位置（改善後）  
※矢印部分の線状キズが最終バリ位置である。

## 4. おわりに

今回は冷鍛部品に発生した「バリ」を不具合として、どのような過程で改善したかの一例を紹介した。この他にも、さまざまな不具合があり、毎回その原因を推測し改善策の効果を確認するPDCA\*1を繰り返している。最近では、鍛造解析ソフトも使いやすくなっており、金型製作の前に検証を行い、数ある候補の中から絞り込んで実際のテストを行うことで、時間・費用の削減が可能となっている。最終的には現場に足を運び、現物での確認が必要であることには変わりがないが、より良い部品が成形できるように、また上手くいったときの現場メンバーの笑顔が見られるよう尽力していきたい。

### 参考文献

- 1) 日本産業標準調査会編，鍛造加工用語，JIS B 0112：1994，日本産業標準調査会
- 2) 日本塑性加工学会編，新塑性加工技術シリーズ9 鍛造，コロナ社，2018，p.186-188,p.199-202

### 用語解説

#### \* 1 PDCA

Plan（計画）Do（実行）Check（評価）Action（改善）の頭文字をとった業務改善のフレームワーク。PDCAサイクル。

# DCブラシレスの開発変遷と今後の展開

Shifts in the Development of DC Brushless Motors and Future Developments

中川 寛之<sup>\*1</sup>

Hiroyuki NAKAGAWA

鵜飼 佑輔<sup>\*1</sup>

Yusuke UKAI

自動化・省エネ・IoT化の動きが一層加速し、高効率化への動きが進んでいる中でDC ブラシレスの需要が高まっている。開発変遷として、インダクションモータに磁気センサを搭載した商品開発をステップとして、特殊形状や必要なギヤ強度、用途別の駆動モーション、カタログ商品と発展してきた。今後、ユーザーとの共同開発につなげるオープンラボ構想に向けて、初号機としての「ミニラボ」を紹介する。

The demand for DC brushless motors is increasing as the trends toward automation, energy conservation and IoT accelerate and the trend toward higher efficiency advances. In the history of the development of these motors, product development began from the mounting of magnetic sensors on induction motors and has progressed with the development of special shapes, the gear strength necessary, application-specific driving motion and catalog products. Going forward, we will introduce a “mini-lab” as the first machine in our efforts towards an open lab concept that would lead to collaborative development with customers.

## 1. はじめに

過去、装置のアプリケーションに最適な製品を多種ギヤ（ヘリカル、ハイポイド、ウォーム等）とインダクションモータにて提供してきたが、制御ニーズに対応するために開発されたDC ブラシレスは、従来ベースの減速部と一体化した「DC ブラシレスギヤモータ」に加え、モータを駆動する「ドライバ」を含めた商品である。

2008年から発売しており、特定用途向けとして、それぞれの装置に合わせた形状やギヤ強度、客先回路との一体化、装置全体としての最適な駆動モーション実現を追求することで伸張してきた。

なお現在は、自動化・省力化・IoT化の動きにも対応できるよう、PCソフト等も加えて、一般市場向けカタログ品の発売にも至っている。

本稿では前段のセンサ部分の開発含めて、特定用途向けのギヤモートル、駆動モーション、一般市場対応等のDC ブラシレス開発変遷と共に、今後の展望を述べる。

## 2. 磁気センサ付モータの開発 (パルサシオン<sup>®</sup>)

### 2.1 センサ開発背景

インダクションモータでの一定速度運転ではなく、インバータを使用しての変速用途が大きく増加する中で、より制御性を高めるために、回転センサの需要があった。

装置の駆動軸よりも、より高速回転するモータ軸に設置する方が、アウトプットされるパルス数が多くなることから、購入したエンコーダを外付けしていた。

ただし、単なるドッキングでもあり、全長寸法が大きくなることや、保護等級がエンコーダに依存してしまうデメリットもあったことから、DC ブラシレスの磁気センサに着目し、インダクションモータに内蔵することでのデメリット解消を目指し開発した。

### 2.2 DC ブラシレスの磁気センサ

DC ブラシレスの磁気センサとは、モータを適切に回転させるために、ロータの位置を検出し、そのポジションに応じた、モータコイル各相（UVW）への通電をするためのものである。

ロータは永久磁石であり、SPモータの場合SNSNSNSN極と計8極となる。それを3つの磁気センサHuHvHw

\*1 モーションコントロール事業部 技術統括 開発部

で検出しており、モータ軸 1 回転あたり、  
 $4(\text{SN パルス}) \times 3(\text{センサ数}) \times 2(\text{通倍}) = 24 \text{パルス}$   
 10P モータなら 30パルスとなる。

### 2.3 パルスシオン開発

パルスシオンは、2.2節で述べた磁気センサの分解能を高めて、インダクションモータに内蔵させた商品である (図 1、表 1 参照)。

開発にあたっては、高温となるモータ内環境での耐熱性、組付精度、モータやブレーキ磁場が発生する影響下での機能確認が必要であった。

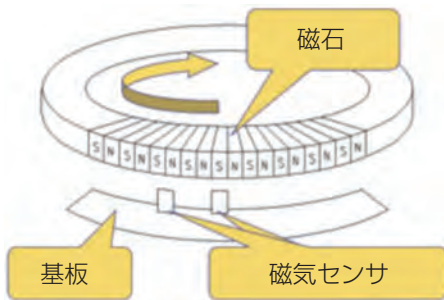


図1. パルスシオン仕組み

表1. パルスシオン仕様

電源電圧	DC4.5~26.4V
パルス数	50 P/R
出力形態	オープンコレクタ出力 (NPN 型) A 相、B 相 90°位相差信号

### 2.4 ブレーキ付パルスシオン開発

特にブレーキによる磁気が、モータ軸を通してモータ内の空間に影響を及ぼしている。磁気センサであることから、ブレーキ磁気影響を軽減するために、磁気の通り路となるシールド板の設置を施し対応している (図 2 参照)。

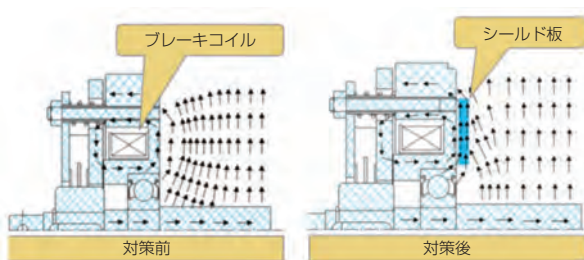


図2. ブレーキ磁気の影響 (矢印↑は磁界の向き)

## 3. DCブラシレス開発

### 3.1 DC ブラシレス開発の経緯

DC ブラシレスは、その名のとおり DC モータ特性を有したモータである (図 3 参照)。

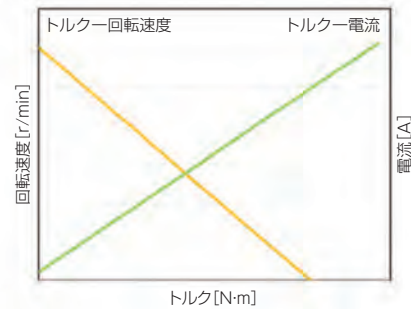


図3. DC モータ特性

トルクと回転速度は反比例しており、最大トルクとなる回転速度は 0 r/min となる。つまりモータの動き出し直後は力強く、起動時に大きな加速トルクが必要である大慣性体の駆動に適している。

インダクションモータの場合、一般的に起動電流は、定格電流の 5~8 倍にも達するが、あくまで実効値であり瞬間ピーク電流はさらに大きくなる。結果として最大電流を許容する容量も含めて、システム全体 (ブレーカやケーブル容量等の経路にも及ぶ) が大きくなるデメリットがあった。

DC ブラシレスならば、磁石モータであることでの高効率 (IE4<sup>\*1</sup>) に加え、負荷に応じた電流のみ発生する。またドライバによる電流制限も可能なことから、最大電流値を抑えることもでき、システム全体の省エネが図れる。

そのため 2 章記載の磁気センサ技術をステップとして開発をスタートした。

### 3.2 DC ブラシレスの LCA 評価

省エネ評価として、DC ブラシレスを採用した場合の LCA<sup>\*2</sup> 評価の一例を以下に示す (図 4、表 2 参照)。

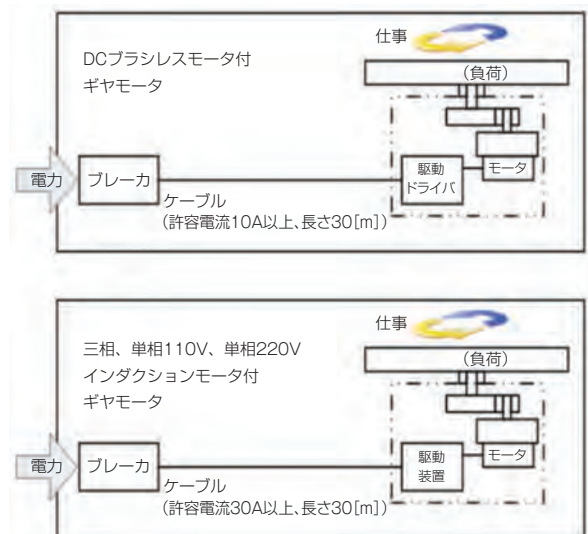


図4. LCA 評価モデル

表2. 製造および稼働に係る排出量

単位 [kg-CO<sub>2</sub>]

機器名称	製造に係る CO <sub>2</sub> 排出量			稼働に係る CO <sub>2</sub> 排出量	全体
	作動部	制御部	小計		
DC ブラシレスモータ付ギヤモータ	20.89	67.11	88.00	1653.15	1741.16
三相インダクションモータ付ギヤモータ	33.79	109.13	142.92	2676.53	2819.45
単相110Vインダクションモータ付ギヤモータ	33.82	69.90	103.72	2973.92	2077.63
単相220Vインダクションモータ付ギヤモータ	33.82	69.90	103.72	2973.92	3077.63

「三相」「単相110V」「単相220V」に対し、「DCBL」は約16%～43%のCO<sub>2</sub>低減となり、省エネ効果が大きいことが伺える（表2参照）。

### 3.3 DC ブラシレス用の減速部ギヤ強度

DC ブラシレスは制御モータであり、慣性比100倍以上大慣性体の用途でも緩起動により駆動できるが、何らかの要因で機械的なロック等の異常が発生した場合、大きな衝撃が発生することから、破損しないように適切なギヤ強度が必要である。

そこで、つばきチェーン製品における衝撃係数<sup>1)</sup>の考え方を踏襲し、ギヤのあそびとしてのバックラッシュは、チェーンのあそびを半分と想定した衝撃係数を見込んでいる（図5参照）。

DC ブラシレスが採用されている、各種用途別の慣性比の一例を示す。

- アンテナ駆動： 10倍 ～ 30倍
- 鉄道可動柵： 50倍 ～100倍
- 自動ドア： 100倍 ～200倍

図5から衝撃係数は2以上となり、ギヤ規格で考えると、AGMA<sup>\*3</sup> CLASS IIIの強度となる。

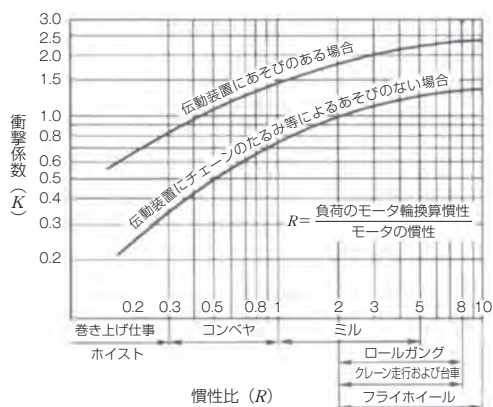


図5. 衝撃係数

### 3.4 特定用途ギヤモータ形状

DC ブラシレスは、永久磁石モータであり、小型化を実現できるが、モータ単体のみでなくギヤモータとして用途に応じた、各装置に見合った形状が望ましく、特殊形状のギヤモータを提供した事例を下記に示す。

#### 3.4.1 高さ制限の事例

ドア開閉用途においては、扉上部のスペース制限があり、能力を最大限活用するために、モータを斜めに配している（図6参照）。



図6. ドア開閉用途ギヤモータ

#### 3.4.2 横幅制限の事例

ゲート開閉用途においては、駆動部がある各ゲート間スペースを抑えることで、他列ゲートでの全体スペース縮小となることから、2段減速で対応できる速比を、幅寸法低減のためにギヤを小径にし、3段減速にて対応している（図7参照）。

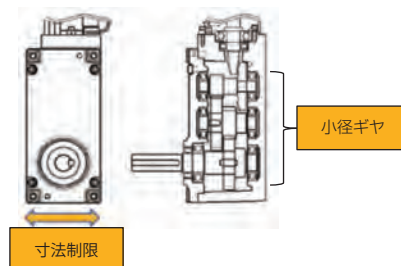


図7. ゲート開閉用途ギヤモータ

### 3.5 特定用途ドライバ回路

装置全体におけるメリットがでるように、ドライバに装置回路の一部を取り込んだ事例を下記に示す。

#### 3.5.1 ノイズフィルタ搭載

ドライバには、インバータ回路を搭載しており、駆動時のスイッチングノイズが発生する。伝導ノイズを抑えるため経路にノイズフィルタ回路が必要であるが、装置のレイアウト都合上、ドライバに取り込み一体化した（図8参照）。

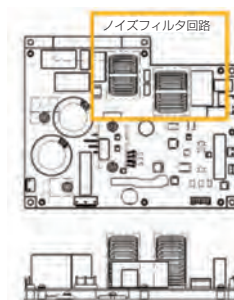


図8. ノイズフィルタ回路搭載

### 3.5.2 装置コントロール機能を兼用

ドライバには、DC ブラシレス制御用のマイコンが搭載されている。装置全体の制御も本マイコンにおいてソフト対応することで可能となり、各センサを直接ドライバに接続できる I/O 回路を搭載した（図9 参照）。

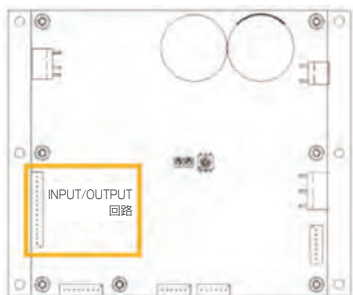


図9. 装置用 I/O 回路搭載

## 4. 駆動モーション・ソフト開発

### 4.1 ソフト面の課題

3章までにおいて、特定用途におけるギヤモータおよびドライバのハード面の対応を述べたが、装置として要望されるモーションの実現ができなければ、役に立たないのは言うまでもない。

2章で述べたとおり、DC ブラシレスの磁気センサ分解能は、1回転24パルス、10極モータの場合でも30パルスと、サーボモータに搭載されているエンコーダ（数千～6700万パルス／回転）と比べて低分解能である。

つまりモータ軸において15°（30パルスの場合は、12°）回転しないと次の信号を取り込めず、その間は判断できないことから、一定区間ごとにおいて、目を瞑りながら走っているのと同じである。そのため外部影響への対処遅れや、理想の動作に対する遅延も発生する。

なおギヤバックラッシュや伝達機構のあそび部において速度急変化時に、慣性により負荷側から回されることでの裏打ち音等の異音も、制御遅れにより発生することもある。理想のモーション実現のためには、モータ駆動用の各種パラメータの適切な設定や、内部データ（回転速度、電流、電圧）を活用しての運転モードの切替や保護等ソフト面が重要となってくる。

### 4.2 装置検証

理想のモーション実現のために模擬装置を製作して、1回転当たりのポジションや回転速度、電流、電圧等を、測定しつつソフト検証を実施している。

### 4.2.1 錘負荷装置

本装置では、錘を持ち上げる時の正負荷、錘を下す時に引張られるマイナス負荷が交互に繰り返される。

繰り返される負荷の急変動（+負荷→0負荷→-負荷→0負荷→+負荷…）や、錘自体の重さの大小に関わらず、1サイクル当たりの速度を維持できる制御と共に、各種保護機能の開発も実施した（図10参照）。

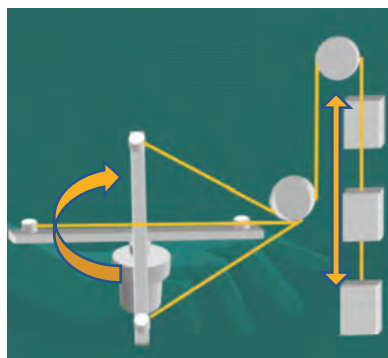


図10. 錘試験装置

### 4.2.2 扉試験装置

本装置では、慣性比100倍以上での起動や減速と停止、自動押し付け動作や半開閉、保護作動後の復帰動作含め各種センサ信号による動作含めた制御開発を実施している（図11参照）。

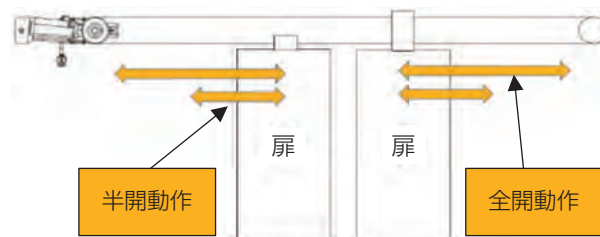


図11. 扉試験装置

### 4.2.3 実負荷検証

模擬装置においてモーションと共に保護機能を開発した後、最終確認として顧客装置に組み込んでの検証や、風洞での実負荷におけるモーション検証も実施している（図12参照）。



図12. 風洞試験

## 5. DCブラシレスハイポイドモートル

### 5.1 DC ブラシレスハイポイドモートル仕様

特定用途に特化した、DC ブラシレスギヤモータを開発してきたが、専用形状や特殊サイズ、特定の電圧範囲であり、汎用性がなくシリーズ化ができていなかった。そこで、インダクションモータを使用しているユーザーへの置き換えや制御を必要とするユーザーへの販売をねらいとして、標準販売している減速部とドッキングできる、ブレーキ付の対応も含めた新しいモータ開発を行った(表3参照)。

表3. DC ブラシレスハイポイドモートル仕様

電動機	出力	0.2kW・0.4kW・0.75kW
		ブレーキ付・無
	電源	0~240V 0~250Hz
	極数	10
	保護方式	全閉型 (IP65*4:本体部のみ IP20*4:ケーブルコネクタ部)
	冷却方式	自冷式
	定格	S1 (連続) 2500r/min
	耐熱クラス	B
	ブレーキ	無励磁作動形・直流保持ブレーキ
周囲条件	設置場所	屋内
	周囲湿度	85%以下 (結露のないこと)
	高度	標高1000m以下
	雰囲気	腐食性ガス・爆発性ガス・蒸気がないこと
	取付方式	制限なし

またパラメータ設定を簡易に行えるように、PCソフトも開発した。本ソフトを使用することで、ユーザー側で設定することが可能である。また、ドライバと通信しながらモータを駆動させることで、モータの状態をウォッチすることもできる(図13参照)。



図13. PCソフト画面

### 5.2 状態把握と活用

各種状態把握、保護機能の設定がPCソフトにて可能となっている。コイル温度・モータ電流以外では、モータ内部に組み込まれたホールICの信号により、モータの回転速度・回転方向といったモータの動作状態も、監視することができる。

また、ホールICの信号を読み取ることで簡易的な位置制御も行うことができる。例えば、ドアにモータを組み込んだ場合、ドアの開閉位置等を検出することができる。

その他に、ドライバの温度・内部電圧・エラー時のログ等を監視することができる。エラー時のログは、モータ保護時のエラーの原因を把握するために必要な機能となっている。

### 5.3 外部機器との連携

モータ駆動用ドライバのインターフェースにはUSB接続用のコネクタやRS-485通信接続用のコネクタが搭載されている。また、通信プロトコルに産業界での普及率の高いModbus-RTU\*5を採用している。よって、PCやPLCといったRS-485に対応した機器との接続が可能である(図14参照)。

外部機器と接続しながら駆動することで、PCへデータをアップロードしたり、サーバにアップロードしたデータを遠隔でモニタリングしたりする等が可能である。



図14. 接続イメージ

### 5.4 通信による拡張性

ドライバにてモータの動作状態をリアルタイムで把握できるため、5.3節で述べたような通信機能を使用することで、新たにセンサを使用せずに動作状態を監視できる。

また、PLCを介して外部ディスプレイを取り付けることにより、装置上で動作状態を監視する等機能を付加

することも可能である。

このように、ドライバで得られる情報を外部へ通信し、ユーザー側で必要な情報を取り出す等の拡張性もある。

## 6. オープンラボ構想

### 6.1 オープンラボ構想

自動化、省力化、そしてIoT化の進展がますます加速しており、外部機器との連携の重要性が増している。そのため、ドライバとの接続を含む各種設定が必要となる。

また一般ユーザーにおいては、装置における最適なモーション実現のための設定ができていないかの判断が難しい問題があり、サポートが不足している。

対応として、顧客装置そのものにDCブラシレスを取付けて検証してのパラメータ設定が理想ではあるが、こちらから出向いてのサポートには限界があり、より多くの顧客対応ができるように、工場に来ていただいて共同で検証できる装置が望まれている。

### 6.2 ミニラボ

まず初号機として、限られた用途であるが、動作確認ができるミニラボを製作した（図15参照）。

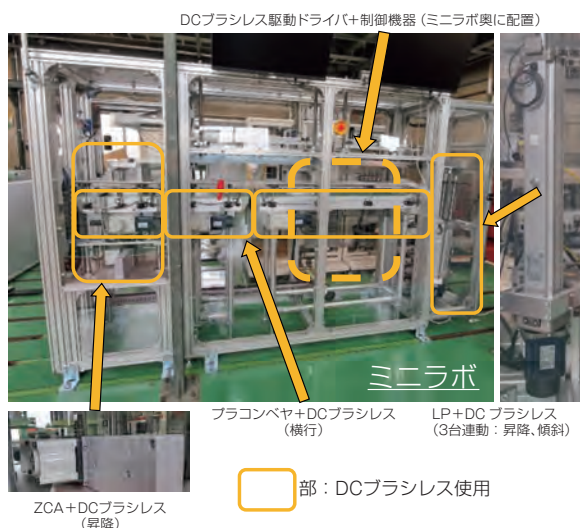


図15. ミニラボ

装置においては、つばき製品として減速機、LP（パワーシリンダ<sup>®</sup>）、ZCA<sup>®</sup>（ジップチェーンアクチュエータ<sup>®</sup>）、プラコンベヤ、ケーブルベヤ<sup>®</sup>を使用し、駆動部としてDCブラシレス7台と、他社インバータ駆動モーター1台の計8台である。

制御面は、各種センサを活用しつつ、他社PLCを介してつばきドライバ7台、他社インバータ1台の構成である。

本装置にて、配線、ノイズ、信号競合、PLC、エラー

等、周辺機器含め要求仕様に対する動作・ソフト検証を行える。

## 7. おわりに

本稿では、ギヤ強度、特殊形状、回路取り込み等の専用設計、模擬装置による駆動モーション検証等の特定用途向け開発事例を紹介した。

今後一般ユーザー含めて、幅広く顧客要望に対応していくための展開として、カタログ品の拡充やオープンラボ構想が必要である。その初号機としてのミニラボを活用し、今後は測定データをリアルタイムで見ながらの検証可能な装置へと発展させ、さらなる開発環境の構築を進める。

近い将来拡張し、お客さまに来ていただけるオープンラボとして、一緒にInnovation in Motionの実現を目指す。

### 参考文献

- 1) 機械要素活用マニュアル, チェーン, (株)椿本チエイン, 1995, p.35

### 用語解説

#### \* 1 IE4

国際電気標準会議 (IEC) が定めたモータの効率クラスで高効率な「スーパープレミアム効率」を意味。

#### \* 2 LCA

ライフサイクルアセスメント (LCA) とは、製品やサービスの資源調達から生産、流通、廃棄、リサイクルまで含めた一連の流れで生じる環境負荷を定量化し、評価する手法。

#### \* 3 AGMA

American Gear Manufacturers Association  
アメリカ歯車工業会 国際ギヤ規格。

#### \* 4 IP65、IP20等

異物の混入に対する保護と水の浸入に対する保護を表したものの。国際的な標準規格であるIEC規格IEC60529で規定されている機器の保護構造。

#### \* 5 Modbus-RTU

PLC向けに策定したシリアル通信プロトコル。  
[Modbus] Schneider Electricの登録商標。

# 歯底径位相周期変動 (BPF) 歯形スプロケットの開発

Development of Sprocket Tooth Profile with Bottom Diameter Phase-Cycle Fluctuation (BPF)

清水 章一郎<sup>※1</sup>

Shoichiro SHIMIZU

本報では、タイミングチェーンとスプロケットの周期的な接触衝撃により発生する噛み合い次数音を低減するため、歯底半径に位相変動を導入した「BPF 歯形」を提案する。接触タイミングを非周期化することで振動エネルギーの集中を抑制し、構造体との共振や音圧ピークの発生を効果的に緩和する。マルチボディ動力学解析およびリグ試験により、静粛性と耐久性の両立が確認され、製造のばらつきを考慮した設計公差の設定も可能となった。

This report proposes the “BPF tooth profile” that introduces phase fluctuation on the bottom radius of the teeth in order to reduce the meshing-order noise that is generated by the periodic contact impact between a timing chain and a sprocket. The introduction of the non-periodic contact timing suppresses the concentration of the vibrational energy and effectively mitigates the resonance with the structure and the generation of sound pressure peaks. MBD analysis and rig testing confirmed that the design realizes both quietness and durability, and it also became possible to set design tolerances that take manufacturing variation into consideration.

## 1. はじめに

### 1.1 騒音低減に対する社会的な要請

近年の駆動系の電動化により、車両全体としての走行騒音は低減傾向にあるが、エンジンが発する機械音が相対的に顕在化しやすくなっている。特に、内燃機関を搭載する車両 (ICE、HEV、PHEV 等) では、低速走行やアイドル時のエンジン音が際立ちやすく、車外騒音規制の強化や車内の快適性向上の観点からも静粛性の確保が重要な課題となっている (表1 参照)。さらに、BEVやFCEVの普及により、内燃機関を持つ車両には、静粛性で電動車との差別化が求められている。この競争環境の中、補機機構を含むパワートレインの静音設計は、自動車製品としての競争力を左右する技術課題の一つとなっている。

### 1.2 タイミングチェーンシステムにおける噛み合い騒音の発生メカニズム

タイミングチェーンシステムは、カムシャフトや一部のオイルポンプを正確なタイミングで駆動する重要な要素である。ローラおよびブッシュチェーンの場合は、スプ

表1. 代表的なパワートレインの種類

区分		内燃機関	電気モータ	特長
ICE	内燃機関車	あり	無し	ガソリンや軽油を燃料にして走る自動車
HEV	ハイブリッド自動車	あり	あり	内燃機関と電気モータの動力を備えている自動車
PHEV	プラグインハイブリッド自動車	あり	あり	内燃機関と電気モータを搭載し、外部充電が可能な自動車
BEV	バッテリー式電気自動車	無し	あり	電気モータを動力源とする自動車
FCEV	燃料電池自動車	無し	あり	水素を燃料にして電気を発生し、燃料電池を動力源とする自動車

ロケットの歯底に接触する際に衝撃が発生し、それが噛み合い騒音の主因となる。この衝撃は、接触時に発生する運動エネルギーが構造体に伝わり、振動エネルギーへと変換されることで生じる。主にチェーンガイドやエンジンカバー等の構造体を介した固体伝播、エンジン室内の空气中を伝わる気体伝播等で拡散し、車内外に音として放射される (図1 参照)。特にアイドルや低速走行時は、駆動力の変動と振動の周期性が強調され、特定の周波数帯に音圧が集中しやすく、車外騒音の要因となる。

※1 モビリティ事業部 技術部

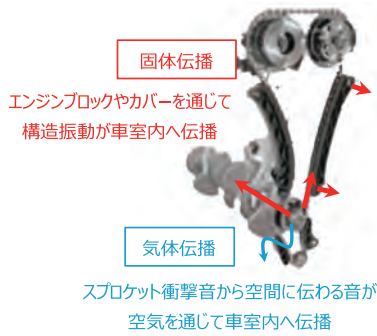


図1. タイミングチェーンシステムにおける音の伝播経路

### 1.3 接触タイミングの非周期化による噛み合い騒音抑制アプローチ

従来のタイミングチェーン機構における騒音対策は、テンションによる張力の最適化やガイド部材への樹脂製緩衝材の追加といった、チェーン挙動を受動的に抑制する方法が中心であった。これらの対策は、噛み合い時に発生する衝撃そのものを直接的に制御する手法ではなく、騒音の根本的な発生源に作用するものではなかった。

本報では、歯ピッチを等間隔のままに、歯底半径に微小な変動を導入することで、噛み合う際の接触タイミングに非周期性を持たせた「不均一歯形スプロケット」を開発した(図2参照)。この設計により、噛み合い衝撃の周期性を構造的に変化させ、共振を引き起こしやすい噛み合い次数成分を分散させることで、騒音の発生源を抑制する新たなアプローチの有効性を検証した。

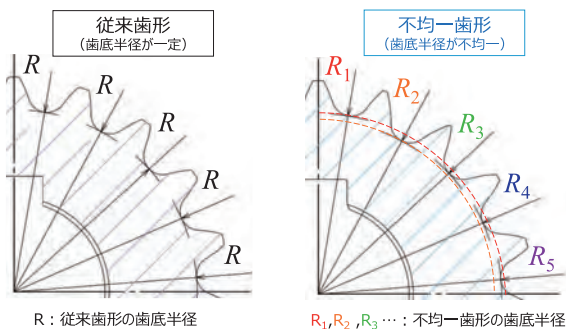


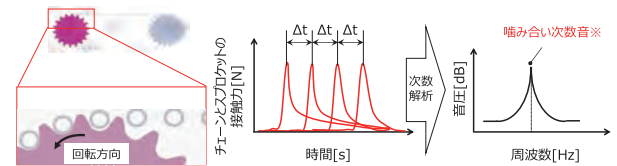
図2. 従来歯形と不均一歯形の概念図

## 2. 技術的背景と課題の整理

### 2.1 騒音発生の要因と構造的背景

チェーンがスプロケット歯底に接触する際、ローラやプッシュの衝突によって周期的な衝撃が発生する。歯ピッチが等間隔の歯形では、この衝撃が一定間隔で繰り返され、噛み合い次数音\*1として特定の周波数に振動エネルギーが集中しやすい(図3参照)。特に、この周波数がエンジン構造体の固有振動数と一致すると、構造体が共振

し、騒音が増幅される恐れがある。また、筐体や周辺部品による音響共鳴により、特定の周波数成分の音圧レベルが上昇し、車外放射音として問題となる可能性がある。



\*噛み合い次数音：チェーンとスプロケットが等間隔に噛み合うことで発生

図3. 周期的衝突による音圧増幅

### 2.2 噛み合い騒音の抑制方策

前節で述べたように、噛み合い騒音の主因は、周期的な接触衝突によって振動エネルギーが特定の周波数に集中することである。この集中が構造体を共振させ、噛み合い次数音として顕在化する。本報では、この騒音を低減するための設計方策を、吸収型・分散型・軽量化型に分類し(図4参照)、その中でも分散型アプローチに着目し、噛み合い周期性を構造的に抑制する設計手法を採用した。

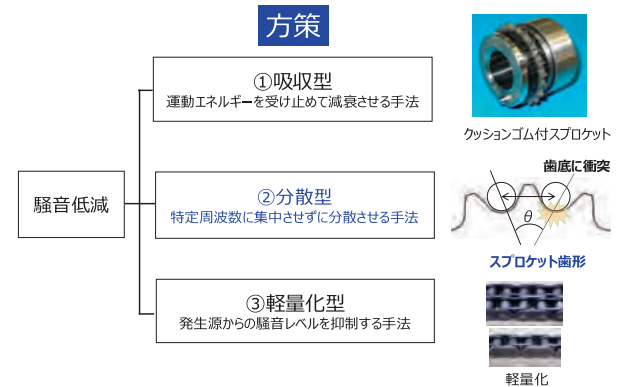


図4. 噛み合い次数音を低減させる方策

### 2.3 非周期化による設計課題の整理

本手法は、スプロケットの噛み合い周期性を意図的に乱し、接触衝撃に伴う振動エネルギーが特定の周波数に集中することを抑制することを目的としている。これにより、噛み合い次数音の顕在化を防ぎ、振動・音圧エネルギーの広帯域化を図る設計思想に基づく。一方、非周期的な歯形設計には、以下の技術的な検討課題がある。

#### 【設計課題】

- ・歯底変動パターンの最適化  
非周期性の効果を安定して発揮させるには、歯底変動の振幅・周期・変動波形の設計パラメータを適切に組み合わせる必要がある。
- ・歯底変動の上限設定と応力集中の回避  
歯底変動の振幅が過大になると、チェーンとの接触位置が偏り、接触力が特定の歯に集中する。この結果、

スプロケット歯元やチェーンブシュの応力が増加し、耐久性が低下するおそれがある。静粛性と信頼性の両立を図るには、変動量の設計上限を適切に設定する必要がある。

・チェーン挙動の安定性

歯底変動によって発生するチェーンの揺動や異音を抑制し、安定した動作を確保する必要がある。

・設計自由度と製造ばらつき管理の両立

量産適用では設計効果を維持しつつ、製造精度やばらつき許容範囲との整合を取ることが不可欠である。

これらの課題には、設計初期段階で歯形ばらつきのパターンを計画的に設定し、構造解析と性能評価を組み合わせた検証プロセスの確立が重要である。

### 3. 設計方針と評価手法

#### 3.1 設計思想

本技術では、スプロケットの歯ピッチを等間隔に維持しつつ、歯底半径に位相変動を導入した新規歯形「BPF (tooth Bottom diameter Phase Fluctuated) 歯形」を開発した。

チェーンピッチやスプロケットの歯間距離には影響を与えず、正弦波形ベースにした滑らかな歯底半径の変動に位相ずれを加えることでチェーンとの接触タイミングを意図的に非周期化し、噛み合い次数成分を広帯域に分散を図る設計思想に基づいている (図5参照)。この構造により、従来歯形では特定の周波数に集中していた衝突エネルギーが拡散され、噛み合い次数音の抑制と静粛性の向上が期待できる。従来の単純な歯形修整とは異なり、スプロケット全周にわたり接触周期を制御することで、構造全体として振動エネルギーを広い周波数帯に分散できる点が特長である。

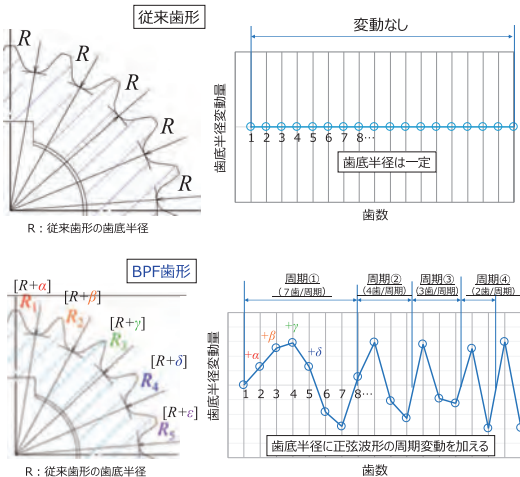


図5. 従来歯形とBPF歯形の形状比較

#### 3.2 設計手法の効率化

自動車エンジンの開発スケジュール短縮が進み、部品設計と性能評価の効率化が重要課題となっている。スプロケット歯形設計では、試作評価ではなく解析を基軸とした設計主導型アプローチが求められる。

本開発では、チェーンとスプロケットの噛み合い動作を仮想再現可能なマルチボディ動力学解析ソフト\*2 ADAMS\*3を活用し、歯底形状の位相変動と接触力や挙動の関係を定量的に評価する独自の設計支援ツールを構築した。このツールにより複数の設計候補を短時間で評価可能となり、設計の初期検討フェーズを大幅に短縮した (図6参照)。

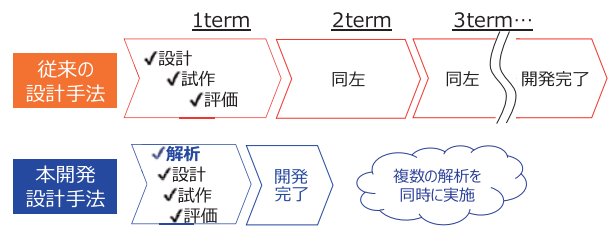


図6. 歯形開発のフローチャート

#### 3.3 歯形選定と検証プロセス

##### 3.3.1 歯形選定の方法

BPF歯形の設計効果を定量的に把握するため、本開発ではADAMSを用いてチェーンとスプロケットの接触力および挙動を解析した。歯底半径の位相変動が接触挙動に与える影響を幅広く評価するため、ラテン超方格サンプリング (LHS)\*4を用いて複数の変動パターンを網羅的に抽出し、各設計条件に対してのチェーンとスプロケットの相互作用を時系列で再現できるシミュレーションモデルを作成した (図7参照)。

このモデルでは、スプロケット歯底とチェーンブシュ間の接触力や、チェーンリンクに発生する張力の時間変化を可視化できる。歯底変動に関わる設計パラメータがチェーン機構に与える影響を数値的に評価するプロセスであり、静粛性や耐久性に関する設計判断を支援する有効なプロセスである。

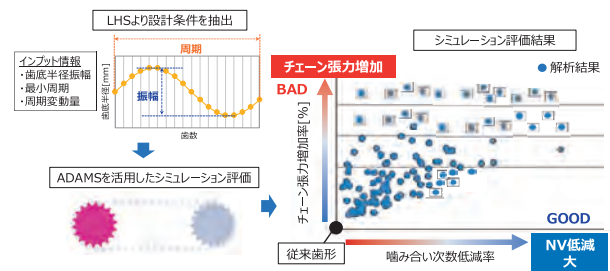


図7. 歯形選定の方法

### 3.3.2 NV 指標 (Noise & Vibration の代替評価)

チェーンとスプロケットの噛み合いに伴う音は、主に接触時の衝撃エネルギーに起因するため、本解析では接触力を音の代替指標 (NV 指標) として活用する。解析環境では音圧を直接算出できないため、スプロケット歯底とチェーンブッシュ間の接触力の時系列データを取得し、高速フーリエ変換 (FFT)<sup>\*5</sup>によって周波数領域に変換することで、噛み合い次数成分の強度や分布傾向を定量的に評価する (図8 参照)。

この指標により、噛み合い衝突によるエネルギーが特定周波数に集中しているか、あるいは広域帯に分散しているかを、数値解析を通じて把握できる。これにより、歯底形状の変更が接触力の周波数特性にどのような影響を及ぼすかを、具体的な数値で間接的に評価できるようになる。

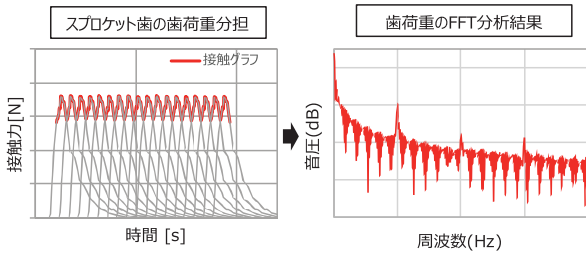


図8. 歯荷重分担のFFT分析結果

### 3.3.3 接触力特性と噛み合い次数低減に基づく歯底変動パターンの最適化

BPF 歯形による接触タイミングの非周期化は、接触力のピーク値や接触時間に変化をもたらし、チェーン構成部品 (本開発ではブッシュチェーン) の強度に影響を与える可能性がある。図9は、スプロケット巻きかかり時における接触力を時間波形とそのFFT解析結果を比較したものである。従来歯形では、接触タイミングが周期的に集中しており、噛み合い1次・2次成分に強いピーク成分が確認された。

一方、BPF 歯形では歯底半径に位相変動を加えることで接触タイミングが非周期化され、力の集中が緩和された。これにより、接触力のピーク値が低下し、FFTスペクトル上でも噛み合い次数成分の抑制が確認された (図9 参照)。

これらの結果から、スプロケット歯元の応力やブッシュの局所破損リスクが低減され、構造信頼性の観点からも本設計の有効性が示された。さらに、接触力分布と噛み合い次数の低減傾向を基に、振幅や波形パターンに関する設計指針を得ることが可能となった。

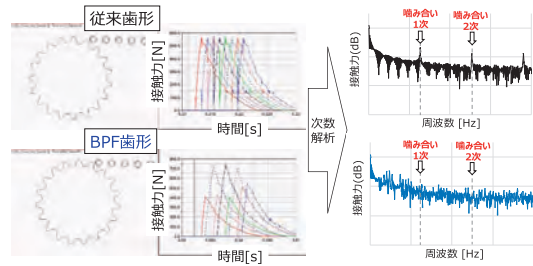


図9. 接触力の時間波形とFFT解析結果の比較

## 4. 性能評価と実用性の検証

性能評価に先立ち、ADAMSによる噛み合い挙動解析と2軸試験機による実測を用いて、スプロケットとチェーンの噛み合い位置を比較し、モデルと実物の整合性を検証した (図10参照)。図10では、従来歯形・BPF歯形のいずれにおいても、ブッシュがスプロケットの歯底曲率 (歯底R) に正しく着座しており、解析モデルが実際の挙動を的確に再現していることが示されている。

この結果は、噛み合いモデルの妥当性を示すものであり、本報におけるNV評価や信頼性、ばらつき解析等の一連の解析プロセスの信頼性を支える根拠となる。

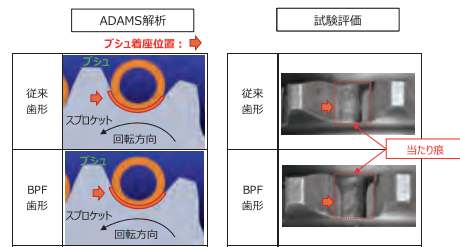


図10. モデルと実物のブッシュ着座位置比較

### 4.1 評価対象と検証の全体構成

従来歯形に加え、歯底振幅の異なるBPF歯形 (振幅: 小・中・大) の計4種類の比較評価を実施した (図11参照)。本評価では、主にNV性能 (噛み合い次数成分の分散効果) を指標としつつ、チェーンおよびスプロケットの耐久性への影響や、設計公差を考慮した量産適用性についても検討を行った。これにより、歯底振幅水準に応じた効果とリスクのトレードオフを明確にした。

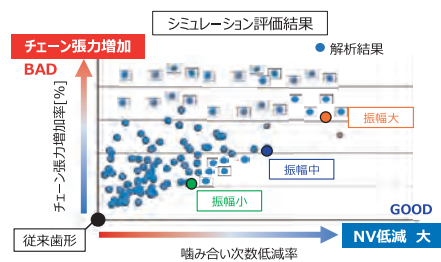


図11. 性能比較用のスプロケット歯形

## 4.2 NV (Noise & Vibration) 性能評価

BPF 歯形の低騒音効果を検証するため、2軸試験機を用いて6000rpmまでのスイープアップ試験を実施した。音響評価にはマイクロホンを使用し、噛み合い1次成分の音圧レベルをトラッキング解析<sup>\*6</sup>により測定した(図12参照)。あわせて振動評価として、駆動スプロケットの軸受近傍に加速度ピックアップを設置し、回転方向の加速度応答をFFT解析により評価した(図13参照)。

従来歯形では、回転速度の上昇に伴い噛み合い1次成分の音圧レベルが全域で高くなる傾向が見られた。一方、BPF 歯形では、歯底振幅の増加に応じて同成分が段階的に低下し、特に「振幅中」および「振幅大」では、従来歯形に対し10dB以上の低減効果が広範囲な回転域で得られた。振動レベルにおいても同様の傾向が確認され、音・振動の双方において噛み合い次数成分の抑制効果が裏付けられた。接触タイミングの非周期化により、噛み合い次数に依存する振動エネルギーの集中を効果的に分散できることを示しており、BPF 歯形の静粛設計としての有効性を明確に示すものである。

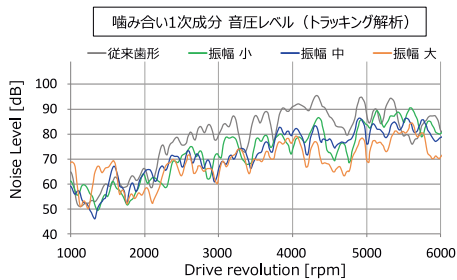


図12. 噛み合い1次成分の音圧レベル比較

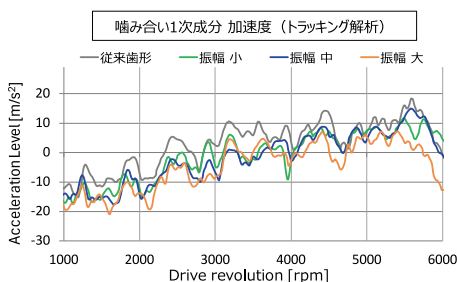


図13. 噛み合い1次成分の振動レベル比較

## 4.3 チェーンおよびスプロケットの耐久信頼性評価

BPF 歯形における歯底振幅の影響を確認するため、チェーン耐久試験を実施した(図14参照)。「振幅大」ではチェーンブッシュに損傷が確認され、耐久性が大きく低下した。これは、過大な歯底振幅により接触挙動が乱れ、局所的な荷重集中が生じたことが一因と考えられる。

ブッシュの座標解析では、振幅の増加に伴ってチェーン挙動の変動が大きくなる傾向が示され、実験のギャップ

センサによる測定結果でも同様の傾向が裏付けられた。なお「振幅中」以下の設計では、一定の挙動変動はあるが、耐久試験で損傷の有意差は見られず、歯底振幅はこの水準までであれば信頼性を維持できると判断した。

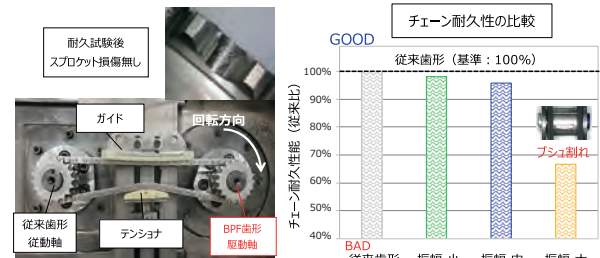


図14. 耐久試験結果の比較

## 4.4 量産時の製造ばらつきに対する設計許容範囲

BPF 歯形を量産に適用するには、製造時に生じるばらつきが性能に及ぼす影響を事前に把握し、適切な設計公差を設定することが重要である。本項では、量産工程で想定される歯底半径のばらつき範囲に基づいて解析モデルを構築し、ばらつき条件ごとの性能影響を評価した。

### 4.4.1 歯底公差の予測解析と性能への影響評価

歯底半径の製造ばらつきがNV性能およびチェーン張力に与える影響を予測するため、公差下限・中央値・上限の3水準で複数のモデルを構築し、ADAMSを用いた動解析を実施した。得られたチェーン張力の時間波形にFFTを適用し、噛み合い1次成分との相関を評価した(図15参照)。

図中では、以下の領域を識別している。

- ：歯底半径が大きい側で張力が上昇し、耐久性リスクが懸念される領域
- △：歯底半径が小さい側で噛み合い次数成分の低減効果が薄れる領域

これらの結果から、公差範囲内のばらつきであれば、NV性能と耐久性の両立が可能である見通しが得られた。

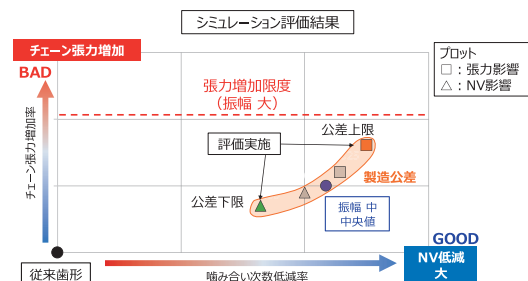


図15. チェーン張力と噛み合い1次成分の相関マップ (歯底公差別)

### 4.4.2 耐久試験による設計公差の妥当性評価

前節の解析結果を踏まえ、歯底半径のばらつきレンジ

(公差上限・中央値・下限)に基づく3種のsprocketを試作し、2軸試験機による耐久試験を実施した。評価項目は、チェーンの耐久性およびsprocket歯の摩耗特性とし、張力変動が構成部品に与える影響(歯損傷やチェーン破断等)を確認した。さらに、試験前後の噛み合い次数音に対する変化を把握するため、マイクロホンによる音圧測定も行った(図16参照)。

その結果、「振幅中」までの水準であれば、実験においても耐久性およびNV性能はともに実用上問題のないレベルであることが確認された。これを受けて、公差上限は「振幅中」以下の範囲に収める設計方針を採用し、量産適用に向けた信頼性確保の基準を明確化した。

以上より、公差レンジ内(下限~上限)であれば、BPF歯形は信頼性とNV性能の両立が可能であり、量産設計として実用性を備えていることが実証された。

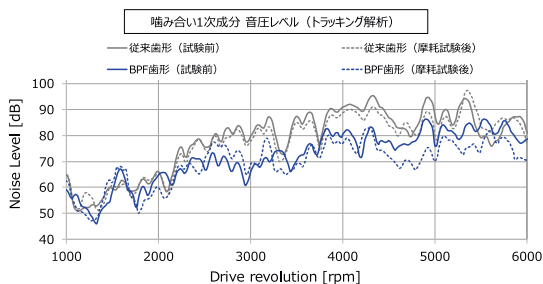


図16. 摩耗試験前後の音圧レベルの比較

#### 4.5 考察

本開発で提案したBPF歯形は、sprocket歯底半径に位相振幅を加えることで接触タイミングを非周期化し、噛み合い次数成分における振動エネルギーの集中を抑制する設計である。解析および実験の結果から、噛み合い次数の低減効果が確認され、共振現象や音圧ピークの抑制に有効であることが実証された。

振幅が過大となるとチェーン挙動の乱れにより接触力や張力が局所的に増大し、sprocket歯元やチェーンブッシュに過度な負荷を与えることが明らかとなった。このことから、信頼性を確保する上での設計限界は「振幅中」レベル以下に設定すべきであるという明確な指針が得られた。

この結果を踏まえ、歯底半径の製造ばらつきについても解析を行い、張力と噛み合い次数成分への影響を可視化し、その妥当性を耐久試験によって検証した。これにより、量産に適用可能な設計公差の設定根拠が明確化され、静粛性と信頼性の両立が可能な歯形設計の実現性が確認された。

噛み合い次数音の抑制を目的に、歯底半径に位相変動を加えたBPF歯形を開発した。

- ・接触タイミングを非周期化することで、噛み合い次数成分へのエネルギー集中を抑え、騒音低減に有効であることを確認した。
- ・歯底変動パターンは統計的手法により設計され、マルチボディ動力学解析と性能評価を組み合わせた設計プロセスにより、開発効率を向上させた。
- ・噛み合い次数音の低減と周波数帯域の広がり確認され、従来歯形よりも優れた静粛性が実証された。
- ・「振幅中」以下の条件であれば信頼性に問題がないことが示され、歯底設計の許容上限が明確になった。
- ・解析と実機試験を通じて適切な設計公差を設定し、量産設計への適用可能性を確認した。
- ・本手法は、周期的衝突や共振が課題となる他の動力伝達系にも応用可能であり、今後の展開が期待される。

#### 参考文献

- 1) 高木 雄大・清水 章一郎 他, 低騒音sprocketの開発, TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.30, No.1, 2020, p.19-22
- 2) わかりやすい静音化技術 騒音の基礎から対策まで, 一宮 亮一 著, 森北出版, p.127-142

#### 用語解説

##### \*1 噛み合い(回転)次数音

回転機械において、1回転に対して1回以上繰り返される現象。歯の噛み合いによって発生する周波数成分。

##### \*2 マルチボディ動力学解析(MBD)

複数の部品が連成して動く機構の動力学挙動を数値的に解析する手法。チェーンやsprocket等の接触力や運動応答をモデル化できる。

##### \*3 ADAMS

Hexagonが提供するMBD解析ソフトウェア。複数の剛体で構成された機構の動的挙動を解析できる。

##### \*4 ラテン超方格サンプリング(LHS)

設計変数の組み合わせを偏りなく抽出するための手法で、少ない試行数で広範な設計空間を効果的に探索できる。

##### \*5 高速フーリエ変換(FFT)

振動や音等の時系列データを周波数成分に変換し、周期的な現象を可視化・分析するための代表的な解析手法。

##### \*6 トラッキング解析

回転速度の変動に対して、特定の噛み合い次数成分の信号強度を追従して評価する周波数解析手法。

## 5. まとめ

本報では、タイミングチェーンの噛み合いに起因する

# マテハン事業におけるオープンイノベーション<sup>\*1</sup>への取り組みと今後の課題

Initiatives for Open Innovation<sup>\*1</sup> in the Materials Handling Business and Future Challenges

工藤 弘之<sup>\*1</sup>  
Hiroyuki KUDOU

現在のモノづくりの現場では、技術の高度化や市場ニーズの多様化に対応するため、従来の自前主義から脱却し外部の知見や技術を積極的に取り込むオープンイノベーションが重要視されている。これは単に新しい技術を導入するだけでなく、企業間の連携や協業を促進し、より革新的な製品やサービスを生み出すための戦略といえる。本稿ではEAGLYS<sup>\*2</sup>（イーグリス）社とのAI協業開発の具体的な事例を挙げながらオープンイノベーションについて考察する。

In order to respond to the increasing sophistication of technologies and the diversifying requirements in the market, manufacturing sites are breaking away from the traditional approach of self-reliance and are emphasizing open innovation<sup>\*1</sup> where they actively incorporate external knowledge and technology. This is not just a strategy to introduce new technologies, but also to promote collaboration and cooperation between companies and to create more innovative products and services. This report considers open innovation through a specific case example of collaborative AI development with EAGLYS.

## 1. はじめに

### 1.1 取り組みの背景

近年 EC 市場拡大により、物流業界では配送貨物物量が増大しており、それに伴う「深刻な労働力不足」「トラブルによる稼働停止のリスク」「導入コストの高騰」等の社会課題がある。マテハン事業部ではこれらの課題解決を目的に、マテハンシステムの無人化・省人化、コスト低減、信頼性の確保等に取り組んでいる。

### 1.2 当社モノづくりの背景

マテハンシステムの構成は大きくは機械要素と制御・情報要素であり、顧客価値を広げやすい領域は後者である。この制御・情報部分にフォーカスすると、これまで主に PLC<sup>\*3</sup>を用いたシーケンス制御技術とそれと連携するコンピュータシステムにより構成されてきた。これらのソフトウェアの設計・開発は、社内に精通した技術者が一定数に在籍しており、設備の立ち上げや安定稼働を高い水準で実現している。一方で新たな価値創出に必要な新しい技術である IoT によるデータ連携、AI の活用、クラウドやビッグデータの活用といった先端技術の導入

や提案については社内技術者の実装経験が乏しく、十分に対応できているとは言えない現状がある。このような背景から、新しいマテハンシステムのモノづくりのあり様（図1）を構築するにあたり、社内の技術資産を生かしつつ、新たな知見を取り入れる体制の整備が急務である。今回は「AI活用プロジェクト」の取り組みにあたり「社内開発力の補完」と「技術者の成長」を同時に実現できる手段としてオープンイノベーションの取り組みの実施状況とメリット、今後の課題について報告する。

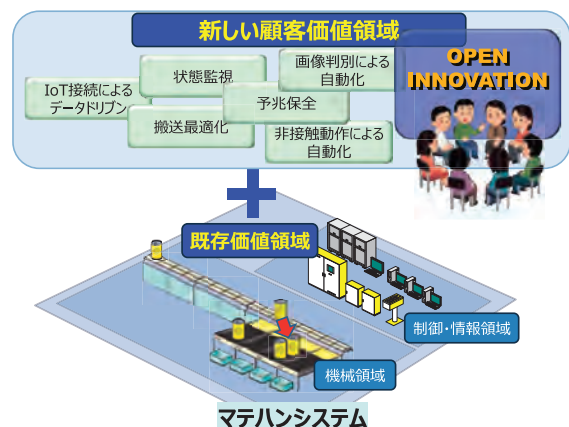


図1. 新しいマテハンシステムのモノづくり

※1 マテハン事業部 技術統括 制御技術部

## 2. オープンイノベーションについて

### 2.1 オープンイノベーションの概念

オープンイノベーションとは自社の枠組みを超え、外部の技術、知識、人材を取り込みながら新たな価値を創出していくアプローチである。これは近年の技術進展が著しい「AIの活用」や「データ分析・利活用」といった分野について特に有効である。この領域の開発は社内の技術資源のみで対応するのは難しく、外部のスタートアップ企業や専門研究機関等との連携が重要となる。

### 2.2 具体的な取り組み・共創のメリット

マテハン事業部は2019年から画像認識要素技術開発をAIスタートアップであるEAGLYS社とオープンイノベーションを行い、物体認識AIソリューションの開発、システムへの組み込み・提供を行っている。

#### (1) 当社のメリット

協業により当社は取り組みが難しかった領域への参入と短期間で画像認識技術の開発手法を手に入れることができ、加えてEAGLYS社の知見を活用することで実証実験の迅速化やそれによるリスク軽減という効果も得られる。同時に技術者に、新たな思考や視点を持たせることも期待できる。

#### (2) EAGLYS社のメリット

EAGLYS社へは「お客さま課題のテーマ」および「その課題解決実証の場」を提供する。これらはEAGLYS社としては得ることが難しい領域であり、基礎研究を実践・実証する機会を得て、技術開発を進めることができる。

行われており、一部のアパレル事業では一般化している。一方でRFIDの普及は一部の業界に限られており広く普及できていない。普及を妨げる要因は、RFIDタグ自体のコストと商品への取り付け作業のコストが挙げられ、この課題解決案の策定はマテハンメーカーとしては難しい。

#### (3) 対応案2：画像認識技術の導入

次なる取り組みとして「AIを活用した画像認識による商品識別」への取り組みへ移行した。あらかじめ商品の画像データを収集しAIに教示しておくことで商品を識別するという手法である(図2)。これは商品ごとの画像教示データ<sup>\*5</sup>を集める必要はあるものの、製品自体への取り付け作業が不要というメリットがある。また教示データの収集という課題はマテハンメーカーの強みとして「多くのピース商品をハンドリングする工程」を担当しており、その中で教示データを収集できる可能性を考えた。

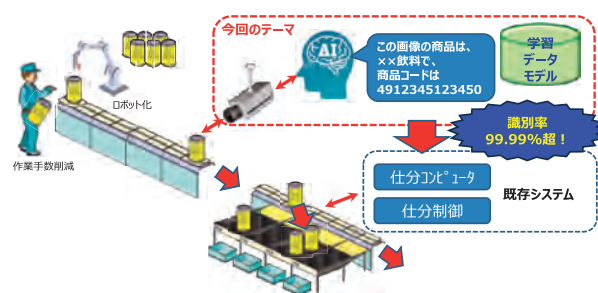


図2. 画像認識による自動仕分け装置構想

## 3. 導入事例と効果

### 3.1 画像認識技術開発について

事例としてEAGLYS社とのオープンイノベーションの取り組みを報告する。マテハン事業部では先に述べた社会課題解決を目的にシステムの無人化・省人化を目指している。今回の取り組みでは「無人化・省人化」を実現する要素技術として「既存のバーコードに代わる自動認識技術開発」にターゲットを定めた。

#### (1) 画像認識技術開発の背景：バーコードの課題

バーコードは優れた識別ソリューションだが、商品によって印刷位置が不定であり、自動でバーコードの位置を探し入力することが困難であり、複数の企業がこの課題に取り組んでいるが決定打が無いのが現状である。

#### (2) 対応案1：RFID<sup>\*4</sup>の導入

ひとつの手段として「RFIDによる一括商品認識」が

### 3.2 チーム体制

#### (1) 社内体制

とはいえ社内にはAIの活用や機械学習やモデルの構築、画像データのサイエンスに関する技術や知見が乏しく、単独ではこの取り組みを開始することはできなかった。この克服としてEAGLYS社との協業開発を行うこととし、若手を中心にプロジェクトチームを発足させた。

<社内の役割>

画像認識・識別装置の要件定義とそれを実現するマテハン装置、画像撮影装置の開発およびデータ管理

#### (2) EAGLYS社について

EAGLYS株式会社は、2016年12月に設立された日本のテクノロジーベンチャー企業で「AI(人工知能)」を活用したセキュアコンピューティング技術が強みである。所属技術者の約4割が外国籍であり、国内外の大学やテック企業とのつながりを持ちグローバルな視点での技術開発とイノベーションが推進できる体制がある。

< EAGLYS 社の役割 >

AI モデル設計、画像データの要件定義、データ収集手法、機械学習、これらの検証および実装

### 3.3 技術的に得られた成果

#### (1) 物流支援ソリューションの創出 (図3)

本ソリューションの概要は、カメラで撮影した画像を AI モデルに入力すると、AI が判断した商品コードを出力し、既存システムへ入力するという仕組みである。

今回のプロジェクトで困難を極めた部分は、「高い認識正解率」を「超高速」で実現したことである。



「AI 画像認識技術」を活用した「AI てむ鑑定士<sup>®</sup>」(右奥の白い筐体)と自動仕分け装置「リニースト<sup>®</sup>」をシステム統合した物流支援ソリューションの導入例

図3. 画像認識技術を活用した物流支援ソリューション

- ・ 目標 1 : 認識正解率99.99% : 達成
- ・ 目標 2 : 上記認識を0.4秒以内に完了 : 達成

今回開発した AI 識別モデルは、当社画像撮像装置専用のモデルであり、この装置環境下で軽い動作と高度な識別性能を出せる構造になっている。これは「ハードウェア開発×AI開発」のすり合わせの賜物であり、オープンイノベーションだからこそその成果といえる。結果、開発した AI 識別モデルは、Kaggle<sup>\*6</sup>で実施された特定物体認識分野コンペティションの上位取り組みと比較しても、Top-1 Accuracy<sup>\*7</sup>が高い値を示しており、高レベルな認識正解率を実現している (同一条件では無いため参考値)。

#### (2) アジャイル開発手法の会得

今回のプロジェクトの成果は「両社協業によるすり合わせ開発」がうまく機能した結果といえる。先の課題解決を日々行うために、両社間で複数の技術者、チーム、部署によるすり合わせが日々行われた。

##### ①週次ミーティング

課題設定、チーム・個人へのタスク割り当て、前回の

課題対応結果共有、結果の DR、今後の方針策定

##### ②日時ミーティング

上記で割り当てられたタスクの分科会。スプリント (短期間試行開発) の構想、提案、実施

コミュニケーションは週次ミーティングを必ず行い、それまでに各チームがタスクをこなし報告するという密なルーティンを廻すことで推進力を出すことができた。スプリントでは不採用になった施策や、失敗に終わったアプローチも多々あったが、これらは今後の開発での重要な資産となる。このように体系だった開発手法を経験し、会得できたことは大きな財産となった。

### 3.4 技術者への波及効果

#### (1) AI 開発手法の知見獲得

オープンイノベーションは単なる技術導入にとどまらず、技術者の育成においても有効な手段である。今回の取り組みにより、当社技術者はこれまで未経験であった AI モデルの設計・チューニング、学習プロセスの理解、精度検証といった工程に関わり、従来の開発では得られなかった経験を積むことができた。

もちろん現段階で AI モデルの独自開発ができるようになったわけではないが、多くのメンバーが EAGLYS 社技術者と技術の方向性やあり様を議論することができるようになったことで、今後さまざまなベンダーと協業していくための資質を得ることができた。

#### (2) 技術者の視野拡大、他プロジェクトへの波及

技術者の学びは AI 関連技術だけにとどまらず、情報技術の知見拡充や、他プロジェクトへの横展開といった波及効果をもたらした。マインドセットの向上により世界最先端の技術活用や、その応用に物怖じすることが無くなったのである。社外エンジニアとのコミュニケーションを通じて、新しい技術手法や OS、言語、ツールに触れる機会が増え、技術習得のスピードが格段に向上した。(フォトグラメトリ、ユニティ、OSS、クラウド活用技術等)。加えて得た知見の他分野への応用や技術課題定義、ソリューション構想構築等も俯瞰する力も育成された。この効果は、当社の GTP<sup>\*8</sup>システム「T-AstroX<sup>®</sup>」のロボット台車 (図4) 開発にも生かされた。



図4. T-AstroX ロボット台車

### (3) EAGLYS 社の成長

EAGLYS 社は、新たな知見としてマテリアルハンドリング技術の考え方、実現へのアプローチ、なによりもビジネス目線でお客さまと寄り添う機会を得ることができ、彼らの知見拡大と技術者の成長に寄与できた。

### (4) 交流の文化・風土の獲得

実のところプロジェクト開始当初は互いに話がなかなか噛み合わなかった。風土、文化、哲学が隔絶していたのである。これは共通の目標に取り組むことや、若手技術者中心のメンバーが付度なくぶつかり合うことで相互理解と絆が深まり、早い段階で解消されていった。こうなると若手は強く、実務に加えオープンイノベーション交流会（図5）を主体的に行い始めた。外部技術者との交流は、知識だけでなく価値観や働き方、チャンレンジ精神にも好影響を及ぼす。



図5. 技術者のオープンイノベーション交流会

## 4. 拡大に向けた課題

### 4.1 体制の確立と支援

オープンイノベーションを推進し、持続的な開発環境と人材育成体制を強化するためには、制度の確立や組織文化の醸成が必要である。開発に従事する技術者がよりテーマに集中できるようにすべく、外部連携先の探索や、連携を円滑に進めるための調整を行う窓口組織が必要と考える。ここでは外部との契約、知的財産の取り扱い、情報セキュリティ対策といった実務面の整備も必要となるであろう。

### 4.2 組織風土の醸成

さらなる協業の拡大として技術者が積極的に外へ開かれた活動を志向させるべく協業や技術交流の場所や仕組みの提供も必要である。社内外の技術者が自由に交流できる場（技術交流会、共創ワークショップ等）を設けることで、組織風土を醸成や拡大につながる。

## 5. まとめと今後の展望

本稿ではオープンイノベーションの実践報告とその効果について報告した。EAGLYS 社との連携による技術導入と人材育成の事例は、今後の開発事案のモデルケースとなると考える。単なるアウトソーシングではなく、共創による知識の融合こそが、企業の競争力強化と持続的成長の鍵を握る。そのためには推進体制の強化や支援、組織風土の改革を推進し、社内外の英知を結集する柔軟な開発体制を確立することが重要と考える。

### 用語解説

#### \* 1 オープンイノベーション

社内社外の垣根なくアイデアやノウハウ、技術を取り入れ、革新的な製品やサービス、事業、ビジネスモデル等の新たな価値を創出するイノベーション手法のひとつ。

#### \* 2 EAGLYS

「EAGLYS」はイーグリズ株式会社の登録商標。

#### \* 3 PLC (Programmable Logic Controller)

マテハン設備や機器を制御する制御装置、コントローラ。

#### \* 4 RFID (Radio Frequency Identification)

電波を用いてモノの識別や情報の読み取りを行う技術。

#### \* 5 教示データ

機械学習や AI の学習過程において「正解ラベル（教師信号）を付けた学習用データ」

#### \* 6 Kaggle

Google 社が提供する機械学習のコミュニティ。「Kaggle」は Google 社の登録商標。

#### \* 7 top-1 accuracy

画像認識タスクにおいてモデルが予測した最も確からしいラベルが実際の正解ラベルと一致している割合を示す指標。

#### \* 8 GTP (Goods to Person)

ロボットに商品棚を運ばせることで、人が商品棚まで足を運ぶという運用を無くす方式。

# 振動制御について

Vibration Control

西井 久雄<sup>\*1</sup>  
Hisao NISHII

製品の性能向上のため、当社では独自の振動制御を開発してきた。最近の事例はさておき、本論文は過去の開発内容であるが、深い学びと沢山の発見があり、現時点でも活用できる3例を解説する。3例は異なる製品が対象であるが、制御対象を深く考察しモデル化、フィードバック系を設計することで目標の性能を得るだけでなく、調整を容易にする利点もある。

Our company has developed unique vibration control to improve product performance. This paper leaves aside recent examples and instead explains three past development case examples that offer deep learning and many discoveries that can still be utilized today. Although the three examples are all for different products, performing deep consideration and modeling of the object to be controlled and designing a feedback system not only make it possible to realize the target performance, they are also advantageous in making adjustment easier.

## 1. はじめに

フィードバック制御の難しさはいろいろあるが、その一つに応答性と安定性のトレードオフがある。言い換えると両者は相反する関係で、位置決め精度や軌跡精度を高めるためにはコントローラのゲインを高くする。しかし高くすると不安定化し振動が発生しやすくなる。

第2章では産業用ロボットの振動制御について述べる。当社では1980年代にロボットを販売していた。その開発では動作範囲が広い円筒座標系型を採用した。ロボットアームを伸ばすと運転停止の際に残留振動が発生し、それが落ち着くまで静定時間が必要で作業サイクルに悪影響を与えた。第3章はクリーンルーム向けのストックアの振動制御であり、2000年頃まで販売していた。当初は軽量の半導体ウエハが搬送対象であったが、その後、液晶用にも販売した。ご存じのように液晶サイズは畳ぐらいに大型化し質量も重くなった。搬送サイクルの高速化要求も激しく、他方、高速化すると搬送物に振動を与えてしまう。第4章は移動ロボット（無人搬送車）である。走行路スペースを極小化するには、目標軌跡を精度よく走る必要がある。そのためには前記ゲインを高くし軌跡偏差量を抑制する。しかし直線走行からR走行に遷移するタイミングで移動ロボットが振動しながら走行してしまい、結果、余分な走行路スペースが必要となる。

本論文は前記問題を解決する制御アルゴリズムの開発について解説する。紙面の関係上、かなり要約して記載した。詳しくは参考文献を一読いただければ幸いである。

## 2. 仮想ダンパを用いた振動制御<sup>1)</sup>

### 2.1 仮想ダンパの発想

産業用ロボットの高速化と高精度化は永遠のテーマである。しかしながらアームの慣性モーメントが大きく、減速機やアームの弾性が無視できない大型ロボットは、低周期の振動が発生しやすくなる。振動を抑制するには、系全体の応答性を低くすることで実現できるが、最終的に満足できる停止精度が得られなくなる。応答性と制振性の相反する仕様を満足させる必要があるため、ロボットの制御設計は難しく、多数の機関で研究が行われている<sup>2) 3) 4)</sup>。

本報告は、仮想的にロボットアームの粘性摩擦を増大させる制御アルゴリズムを設計し振動を抑制する手法を提案する<sup>5)</sup>。釣り竿を頭上から振り落とし停止させると、手元は停止するが釣り竿の先端は振動する。しかし水中で同じ行為をしても振動しない。そこで、制御アルゴリズムで粘性を増大させ振動を抑制するという発想で仮想ダンパと称した。

### 2.2 ロボットのモデリング

制御対象を数学モデルで表現することは、制御アルゴ

\*1 DX・IT・研究開発センター

$$\tau_{m1} = \left[ J_{m1} + \frac{q_1}{N^2} \right] \ddot{\theta}_{m1} + \frac{q_1}{N} \ddot{\theta}_{a1} + \frac{q_2}{N^2} \ddot{\theta}_{a2} + \frac{q_3}{N} \ddot{\theta}_{a2} - \frac{2q_3}{N^2} \dot{\theta}_{a1} \dot{\theta}_{a2} - \frac{2q_3}{N^2} \dot{\theta}_{m1} \dot{\theta}_{a2} - \frac{2q_3}{N^2} \dot{\theta}_{a1} \dot{\theta}_{a2} - \frac{2q_3}{N} \dot{\theta}_{a1} \dot{\theta}_{a2} - \frac{q_3}{N^2} \dot{\theta}_{a2}^2 - \frac{2q_3}{N^2} \dot{\theta}_{a2} \dot{\theta}_{a2} - \frac{q_2}{N} \dot{\theta}_{a2}^2 + D_{m1} \dot{\theta}_{m1} + \frac{1}{N} (p_4 \cos \beta + p_5 \cos \gamma) \quad (1)$$

$$\tau_{a1} = \frac{q_1}{N} \ddot{\theta}_{m1} + q_1 \ddot{\theta}_{a1} + \frac{q_2}{N} \ddot{\theta}_{m1} + q_2 \ddot{\theta}_{a2} - \frac{2q_3}{N^2} \dot{\theta}_{m1} \dot{\theta}_{a2} - \frac{2q_3}{N} \dot{\theta}_{m1} \dot{\theta}_{a2} - \frac{2q_3}{N} \dot{\theta}_{a1} \dot{\theta}_{a2} - q_3 \dot{\theta}_{a1} \dot{\theta}_{a2} - \frac{q_3}{N^2} \dot{\theta}_{a2}^2 - \frac{2q_3}{N} \dot{\theta}_{a2} \dot{\theta}_{a2} + q_3 \dot{\theta}_{a2}^2 + D_{a1} \left( \frac{1}{N} \dot{\theta}_{m1} + \dot{\theta}_{a1} \right) p_4 \cos \beta + p_5 \cos \gamma + K_1 \theta_{a1} \quad (2)$$

$$q_1 = p_1 + 2p_2 \cos \alpha \quad q_2 = p_3 + p_2 \cos \alpha \quad q_3 = p_2 \sin \alpha$$

$$\alpha = \theta_{m2}/N + \theta_{a2} \quad \beta = \theta_{m1}/N + \theta_{a1} \quad \gamma = \alpha + \beta$$

$\tau_{m1}$ : 第1旋回軸モータ入力トルク     $\theta_{m2}$ : 第2旋回軸モータ回転角度     $D_{a1}$ : 第1旋回軸アーム粘性摩擦  
 $\tau_{a1}$ : 第1旋回軸アーム入力トルク     $\theta_{a2}$ : 第2旋回軸減速機ねじれ角度     $N$ : 減速比  
 $\theta_{a1}$ : 第1旋回軸減速機ねじれ角度     $D_{m1}$ : 第1旋回軸モータ粘性摩擦     $K_1$ : 減速機バネ定数  
 $\theta_{m1}$ : 第1旋回軸モータ回転角度     $J_{m1}$ : 第1旋回軸モータイナーシャ     $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$  は定数

リズム設計を行う上で特に重要である。そこで、ラグランジュの運動方程式を立て、ロボットのブロック図を求める。ラグランジュの運動方程式で注意することは、ポテンシャルエネルギーを位置エネルギーと減速機の弾性エネルギーの和としたことと、損失エネルギーとしてモータとロボットアームの粘性摩擦のみを考えたことである。

その結果、式(1)に第1旋回軸のモータ部の運動方程式を、式(2)に第1旋回軸のアーム部の運動方程式を得る。

アーム部にはトルク源が存在しないから $\tau_{a1}$ は零である。よって式(1)と式(2)をまとめ、さらに位置ループと速度ループを付加する。ここで

$$\theta_{a1} = \beta, \theta_{a2} = \alpha, K_p: \text{位置ゲイン}, K_v: \text{位置ゲイン}$$

$$K_t: \text{トルク定数}$$

とする。また式(3)から式(6)を以下に定義する。式(4)式(6)は干渉力である。

$$J_{a1} = q_1 \quad \dots (3)$$

$$T_1 = q_2 \ddot{\theta}_{a2} - 2q_3 \dot{\theta}_{a1} \dot{\theta}_{a2} - q_3 \dot{\theta}_{a2}^2 + p_4 \cos \beta + p_5 \cos \gamma \quad \dots (4)$$

$$J_{a2} = p_3 \quad \dots (5)$$

$$T_2 = q_2 \ddot{\theta}_{a2} + q_3 \dot{\theta}_{a1}^2 + p_5 \cos \gamma \quad \dots (6)$$

式(1)式(2)からモータに働く相互干渉力・重力・コリオリ力等の総和と、そのモータに取り付けてある減速機の弾性力は比例関係にあることが分かる (式(7)参照)。

$$T_{m1} = \frac{1}{J_{m1}} \ddot{\theta}_{m1} + D_{m1} \dot{\theta}_{m1} + \frac{K_1}{N} \theta_{a1} \quad \dots (7)$$

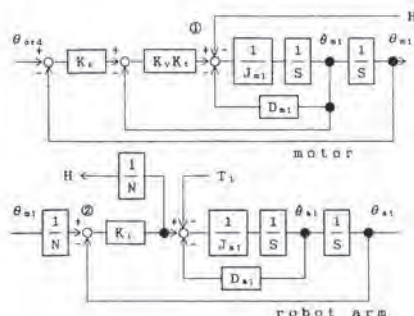


図1. 第1旋回軸のブロック図

上記の結果、第1旋回軸のブロック図は図1となる。図2図3に実測した周波数特性を示す。図4図5にはモデルのシミュレーション結果を示す。これらはモデルの妥当性を示すもので、また減速機の入力と出力では特性の大きな違いが確認でき、弾性項の存在が確認できる。

### 2.3 制御系の設計と試験結果

図1のアーム部に注目すると、それが減衰のあるバネ振動系であることが言える。 $\theta_{m1}$ を零とすると図1のアーム部は自由振動系になり、粘性摩擦 $D_{a1}$ が式(8)を

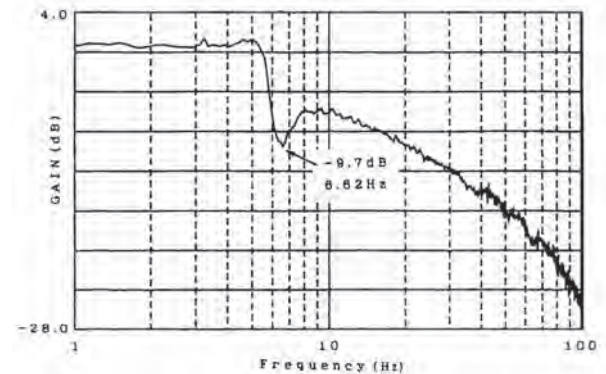


図2. 第1旋回軸指令角度とモータ軸回転角度の周波数特性 (実測値)

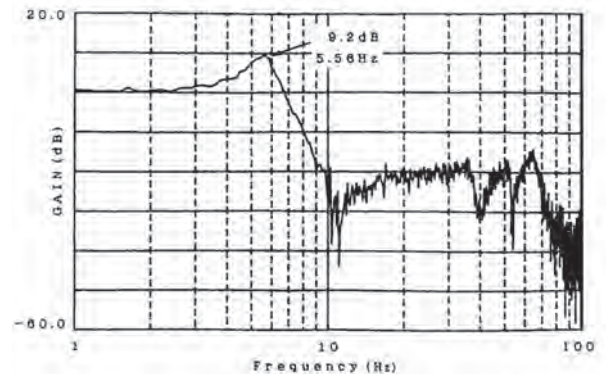


図3. 第1旋回軸指令角度と減速機出力回転角度の周波数特性 (実測値)

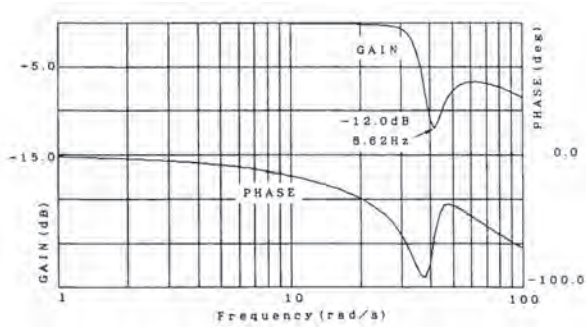


図4. 第1旋回軸指令角度とモータ軸回転角度の周波数特性 (シミュレーション)

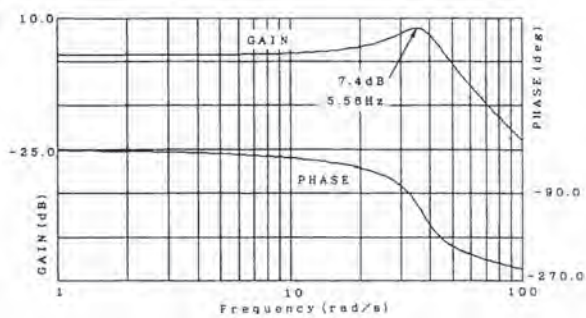


図5. 第1旋回軸指令角度と減速機出力回転角度の周波数特性 (シミュレーション)

満足する場合、アームの回転角度の一般解は式(9)になる (一般的なロボットは式(8)を満足する)。

式(9)は、振幅が時間に対して指数関数的に小さくなっていく単振動と考えることができる。減衰項に注目すると、 $D_{a1}$ を大きくするか $J_{a1}$ を小さくすることで防振効果を得ることが分かる。

$$D_{a1}^2 < 4J_{a1}K_1 \quad \dots (8)$$

$$\theta_{a1} = A \exp\left(-\frac{D_{a1}}{2J_{a1}}t\right) \times \cos\left(-\frac{\sqrt{4K_1J_{a1}-D_{a1}^2}}{2J_{a1}}t + \phi\right) \quad \dots (9)$$

よって、仮想的に (制御アルゴリズムで) アームの粘性摩擦 $D_{a1}$ を大きくすることを考える。仮想的に $J_{a1}$ を小さくすると、もし負になれば減衰項は発散項になる。ダイナミクスの変化を考えると $D_{a1}$ に注目した方がよい。また式(8)を満足しない場合は、応答性の悪い系になることを考慮すると、仮想的粘性摩擦増加量 $D_x$ の上限値式(10)を得る。

$$D_x < \sqrt{4K_1J_{a1}} - D_{a1} \quad \dots (10)$$

アームの粘性摩擦を $D_{a1}$ から $D_x$ 量増加させるには、図1の②に $D_x/K_1$ と $\dot{\theta}_{a1}$ を乗算した値を負帰還 (強制振動) すれば良い。しかし②はトルク源がなく実際に負帰還することが不可能である。トルク源はモータ部に存在し図1の①に負帰還する必要がある。よって図1の①から②の信号流れを考えると、仮想的にアームの粘性摩擦 $D_x$ を増加させるには、式(11)の計算結果を①に負帰還することと等価である。

$$(J_{m1}SSND_x/K_1) \times \dot{\theta}_{a1} \quad \dots (11)$$

Sはラプラス演算子である。他方、図1の速度や位置

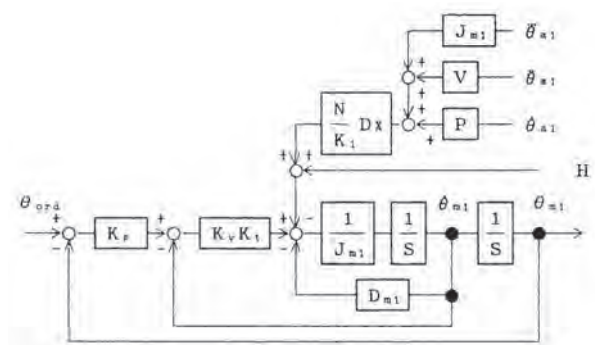


図6. 提案する制御アルゴリズム

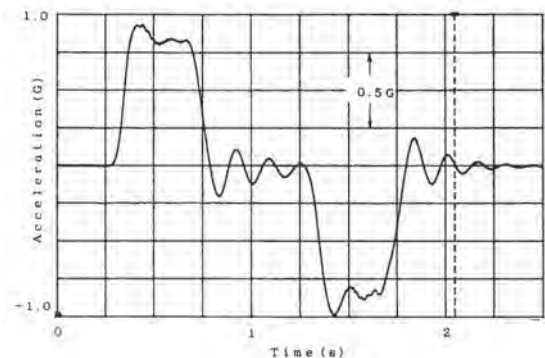


図7. ロボット先端の振動 (従来アルゴリズム)

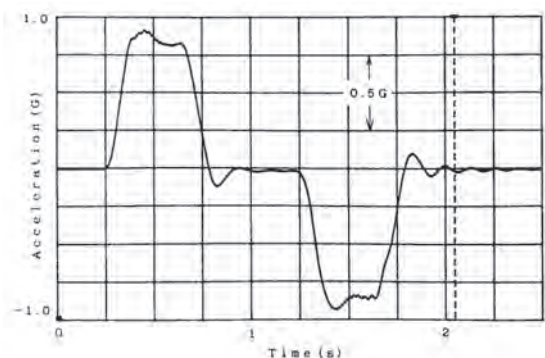


図8. ロボット先端の振動 (提案するアルゴリズム)

のフィードバックも考慮すると提案する制御アルゴリズムは図6となる。

図7図8に提案する手法の効果を示す。振動抑制を確認でき、また調整パラメータは $D_x$ だけで良い。さらに図6ではアーム旋回の躍動や加速度、速度情報が必要だが、新たなセンサを取り付けず既知のモータ情報にて推定計算させている。

### 3. LCD用ストックの振動制御<sup>6)</sup>

#### 3.1 外乱オブザーバの活用

液晶ディスプレイ (以下 LCD) は当初小型の電卓とデジタル時計を中心に市場を形成してきたが、大型化・

高解像度化・低価格化と技術的な進歩を遂げ、OA 機器や TV に代表される表示装置に応用されている。生産工程における LCD の搬送や保管を考える時、LCD の大型化および LCD 自体が振動を嫌うことから搬送装置やストッカ等の設備機械は機械剛性を一層高くする必要がある。また、LCD が生産されるクリーンルームは単位面積当たりの設備コストが高いことから、保管スペースの削減は重要である。そこで保管棚の間口ピッチを最小限にするため位置決め精度を高くする必要がある。一方、機械の高剛性化はコストアップや機械質量の増加につながり、機械設計と制御設計とのトレードオフが肝要である。特に制御設計によるアプローチは理論の著しい進歩やコストへの影響が少ないことから有効な手段と考える。

第3章では LCD 用ストッカの走行駆動系を制御対象として、制御アルゴリズムにより位置決め精度を高くし、また、振動抑制を実現する方法を記載する。具体的には図9のようにストッカは発塵を抑制するため Z 軸は 1 本マスト構成 (Z 軸ポール) になりアルミ材とした。従って剛性は高くなく振動問題が発生する。他方、走行の高速化要求もある。ストッカの場合、第2章のような詳細な線形モデリングの手法は使えない。というのは搬送物の質量はいろいろで、非線形性が強いからである。そこで搬送質量が変化しても、それを外乱オブザーバ<sup>7)</sup>で推定し振動を抑制するアルゴリズム開発を発想した。要は詳細なモデリングを不要とした。ここで言う外乱とはモータへの反力の総和を意味する。

### 3.2 走行駆動系のモデリング

走行駆動系のモデルを把握することは制御アルゴリズムで特に重要である。しかしながら前項に示すように非線形要素が強く、FFT により周波数特性を実測した。図10に示すが、代表的な反共振点が存在することが分かる。その周波数は機械系の固有振動と一致した。従って、機械系が 2 慣性系に近似でき、弾性項がマスト取り付け部分に集中した系と仮定できる。

### 3.3 制御系の設計と試験結果

文献3)において、2 慣性系の振動抑制には、ロボットアーム先端の振動をフィードバックすることが有効であった。従って今回はマストの振動をフィードバックすれば良い。2 慣性系の振動は弾性部位のねじれによるポテンシャルエネルギーがあり、その力はモータの反トルクとなる。従ってモータから見ると外乱を計測すれば良い。外乱を測定するセンサは物理的・ノイズ的・価格的な影響があり、オブザーバ理論を使い外乱を推定することにした。

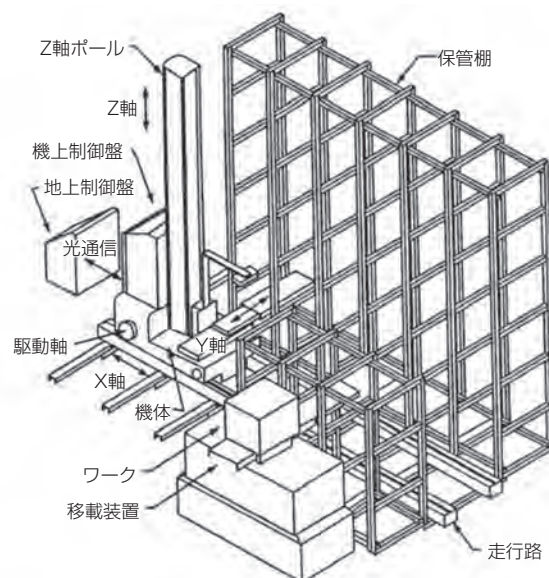


図9. LCD 用ストッカの概略図

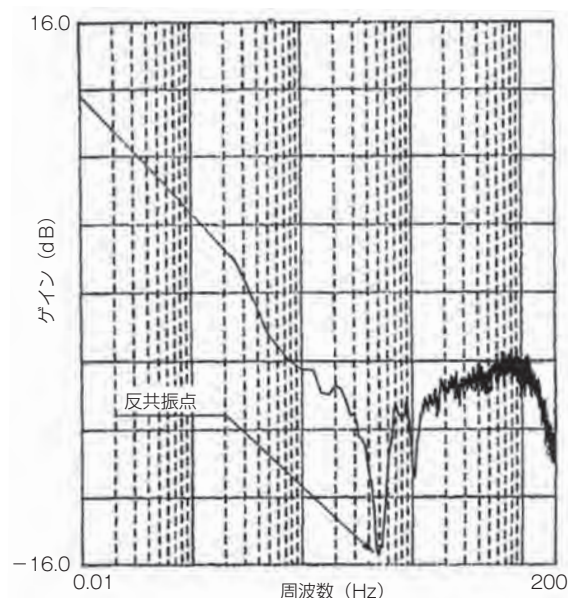


図10. 走行軸の周波数特性

制御対象の状態方程式は一般的に、状態変数を  $x$ 、入力を  $u$ 、出力を  $y$ 、 $A \cdot B \cdot C$  はモデルで決まる行列とすると、式(12)式(13)となる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \cdots (12)$$

$$y = Cx \quad \cdots (13)$$

ここで、推定する変数を  $x_h$ 、任意の行列を  $K_h$  とするとオブザーバは式(14)になり、 $A - K_h C$  が安定行列ならば  $x_h$  は  $x$  の漸近的再現値として使える。

$$\dot{x}_h = (A - K_h C)x_h + K_h y + Bu \quad \cdots (14)$$

オブザーバ設計であるが、その極を小さくすると周波数の高いノイズ成分を含む結果を得る。これはデジタル制御の量子化問題が原因の一つであると考えられる。制御系の内部計算を精度の良い浮動小数点演算しても、DAC や

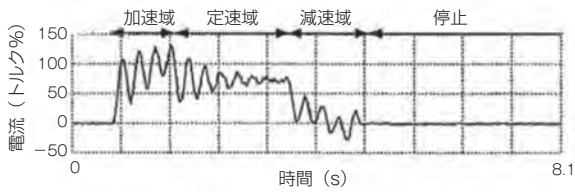


図11. 従来の制御方法（モータ電流特性）

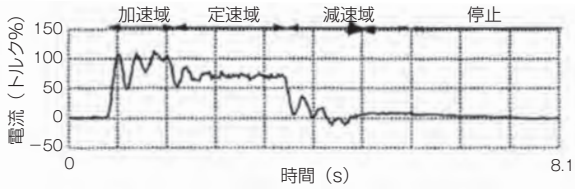


図12. 提案する制御方法（モータ電流特性）

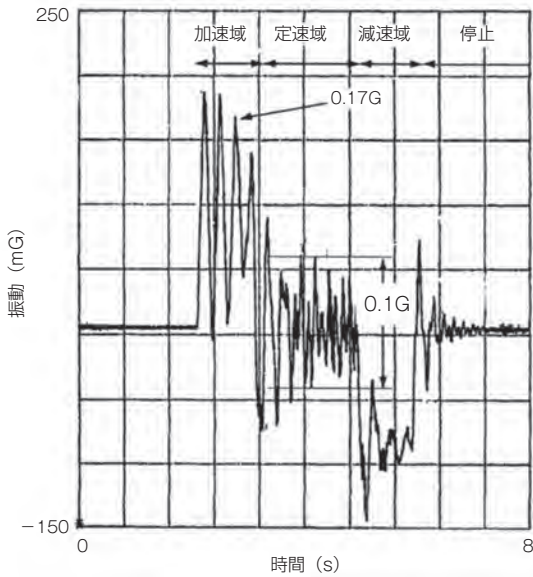


図13. 従来の制御方法（振動特性）

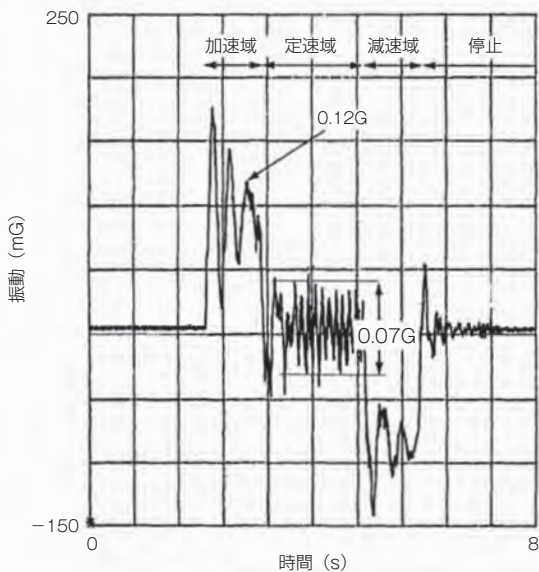


図14. 提案する制御方法（振動特性）

エンコーダの分解能で全体の精度が制約される。オブザーバの極を大きくすると、一種のフィルターの役割を行いノイズが軽減できる。しかしながら極を大きくし過ぎると、推定偏差の収束時間が長くなり新たな問題を発生する。よって制御対象の極よりも、オブザーバの極を少し小さくする程度にオブザーバを設計する必要がある。

図11図12に提案する手法の効果をモータ電流特性で示す。従来方法は振動による反力の影響で電流が乱れており、提案する手法の振動抑制を確認できた。図13図14はマストで昇降する移載装置上のLCD振動を示す。30%程度の振動抑制効果を確認した。電流特性ほど顕

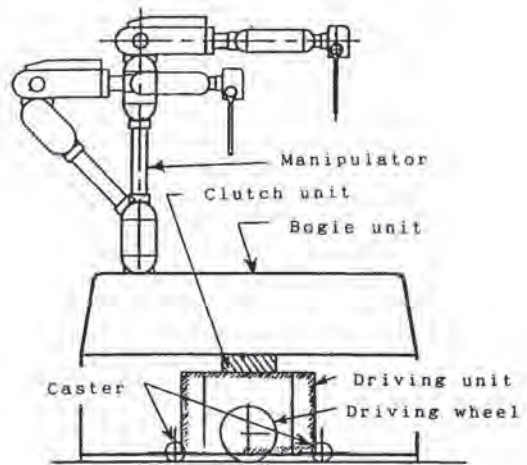


図15. 移動ロボットの概略図

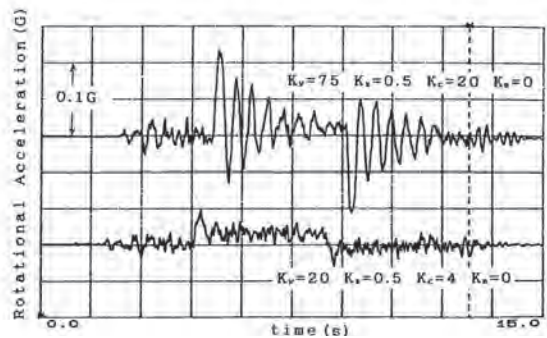


図16. 旋回方向振動特性

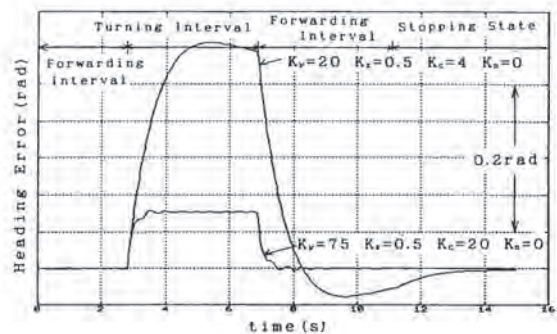


図17. 旋回方向偏差特性

著な効果は確認できないが、これはマスト部の制御性能ではなく、その先の移載装置の影響である。

## 4. 移動ロボットの振動制御<sup>8)9)10)</sup>

### 4.1 はじめに

クリーンルームでは設置面積当たりの設備コストが高く、省スペース化が望まれる。移動ロボット(図15)の走行路の極小化も重要であり、また高速搬送の要求もある。もちろん搬送物は振動を嫌う。走行軌跡精度や移載ステーションでの停止位置決め精度を満足するため、移動ロボットの位置・方位ゲインを高くする必要がある。高ゲインで直線ルートからRルートに遷移する時、移動ロボットは振動を発生しやすくなる(図16)。結果、ゲインを抑えると振動は抑制されるが方位偏差が大きくなり走行軌跡が大回りになる(図17)。ここで $K_y$ は進行ゲイン、 $K_x$ は横ゲイン、 $K_c$ は方位ゲイン、 $K_n$ は後述する振動ゲインである。

また、この振動問題はクリーンルームだけではなく一般的な工場での活用でも言える。

### 4.2 移動ロボットのモデリング

第2章同様に、振動を抑制するには、その制御対象の動特性を把握する必要がある。これは制御対象の数式モデルを作成することを意味する。そこでラグランジュの運動方程式から移動ロボットのブロック図を求め、状態方程式を導き出す。

図15の移動ロボットは左右駆動輪が独立に制御可能であり、各駆動輪の速度差で旋回走行を行う。移載装置として台車部上に6リンクのマニピュレータを設置する。移動ロボットは駆動輪のほかに4個の自由輪(キャスタ)で支持されている。また横走行・斜め走行機能を有するため、台車部と駆動部をクラッチで接続する機構

になっている(以下接続点と呼ぶ)。これによりクラッチを解放した状態でスピントーン動作を行い、台車部と駆動部の相対角度を任意に設定できる。

移動ロボットは軽量化に伴い旋回方向の剛性が低くなっている。よって運動方程式を立てる上で旋回方向の一次モードの弾性力と粘性摩擦力を考慮する。ここで弾性項は接続点の一点集中形と仮定できることとする。また自由輪の影響によるピッチング方向の弾性項も存在するが本報告ではそれを考慮せず旋回方向に的を絞り議論を進める。移動ロボットの運動エネルギー $K$ 、損失エネルギー $D$ 、ポテンシャルエネルギー $P$ とし式(15)~(17)で表現する。ラグランジュの運動方程式を解くと 図18のブロック図を得る。

$$K = \frac{1}{2}J_{mr}\dot{\theta}_{mr}^2 + \frac{1}{2}J_{ml}\dot{\theta}_{ml}^2 + \frac{1}{2}M\dot{Y}^2 + \frac{1}{2}J_b\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_z(\dot{\theta} + \dot{\theta}_s)^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$D = \frac{1}{2}D_z(\dot{\theta} + \dot{\theta}_s)^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$P = \frac{1}{2}K_z\theta_s^2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\tau_{ml} = A_1\ddot{\theta}_{mr} + A_2\ddot{\theta}_{ml} - A_3\ddot{\theta}_s - A_4\dot{\theta}_{mr} + A_4\dot{\theta}_{ml} - A_5\dot{\theta}_s \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\tau_{mr} = A_2\ddot{\theta}_{mr} + A_1\ddot{\theta}_{ml} + A_3\ddot{\theta}_s + A_4\dot{\theta}_{mr} - A_4\dot{\theta}_{ml} + A_5\dot{\theta}_s \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\tau_s = A_3\ddot{\theta}_{mr} + A_3\ddot{\theta}_{ml} + J_z\ddot{\theta}_s + J_z\dot{\theta}_{mr} - A_5\dot{\theta}_{ml} + D_z\dot{\theta}_s + K_z\theta_s \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\dot{Y} = A_6(\dot{\theta}_{mr} + \dot{\theta}_{ml})$$

$$\dot{\theta} = A_7(\dot{\theta}_{mr} - \dot{\theta}_{ml})$$

$$A_1 = MA_6 + (J_b + J_z)A_7^2$$

$$A_2 = J_m + MA_6 + (J_b + J_z)A_7^2$$

$$A_3 = J_zA_7 \quad A_4 = D_zA_7^2$$

$$A_5 = D_zA_7 \quad A_6 = D_l/(4N) \quad A_7 = D_l/(2BN)$$

$\tau_{ml}$ : 左駆動輪モータ出力トルク

$\tau_{mr}$ : 右駆動輪モータ出力トルク

$\tau_s$ : 旋回方向ねじれ出力トルク

$\theta_{ml}$ : 左駆動輪モータ回転角度

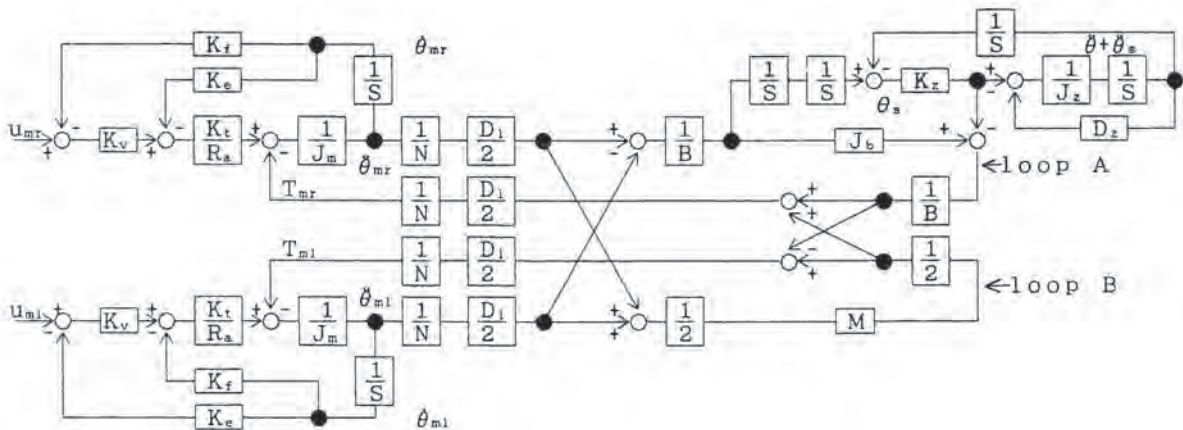


図18. 移動ロボットのブロック図

- $\theta_{mr}$ : 右駆動輪モータ回転角度
- $\theta_s$ : 旋回方向ねじれ角度
- $J_m$ : 左右駆動輪イナーシャ
- $J_b$ : 駆動部旋回方向イナーシャ
- $J_z$ : 台車部旋回方向イナーシャ
- $D_z$ : 接続点粘性摩擦  $K_z$ : 旋回方向ばね定数
- $D_l$ : 車輪直径  $M$ : 台車質量
- $N$ : 減速比  $B$ : 左右車輪間隔
- $K_v$ : 速度ゲイン  $K_t$ : トルク定数  $K_e$ : 逆起電力定数
- $K_f$ : 速度変換定数  $R_a$ : 電機子抵抗
- $u_{mr}$ : 右駆動輪モータ指令速度
- $u_{ml}$ : 左駆動輪モータ指令速度

図19に移動ロボットの周波数特性の実測値を、図20にシミュレーション結果を示す。両図の類似性から算出したモデルの妥当性が確認できる。

### 4.3 提案する制御方法

4.2節で作成した移動ロボットのブロック線図18から移動ロボットは干渉系であり、各駆動輪モータに反力が作用していることが分かる。図のループBは移動ロボットの前進加速度であり、それは左右駆動輪モータに同符号で反力として影響する。ループAは旋回加速度と弾性力の関数であり、左右駆動輪モータに異符号で影響する。

左右駆動輪モータの反力の差（ループAの影響）は

移動ロボットの旋回方向を乱す働きを行うことから、これが旋回方向の振動の原因であると考察できる。よって反力の差の情報をフィードバックすることで制振効果が期待できる。

式(15)から式(20)より右駆動輪モータの反力 $T_{mr}$ 、左駆動輪モータの反力 $T_{ml}$ は、式(21)式(22)となる。

$$T_{mr} = (A_8 + A_9)\ddot{\theta}_{mr} + (A_8 - A_9)\ddot{\theta}_{ml} - A_{10}\theta_s \cdots (21)$$

$$T_{ml} = (A_8 - A_9)\ddot{\theta}_{mr} + (A_8 + A_9)\ddot{\theta}_{ml} + A_{10}\theta_s \cdots (22)$$

$$A_8 = MA_6^2 \quad A_9 = J_b A_7^2 \quad A_{10} = K_z A_7$$

左右駆動輪モータの反力の差 $T_e$ は、式(21)と式(22)の差から式(23)となる。

$$T_e = 2A_9(\ddot{\theta}_{mr} - \ddot{\theta}_{ml}) - 2A_{10}\theta_s \cdots (23)$$

制振効果を得るために左右駆動輪モータの指令速度に式(23)に制振ゲイン $K_n$ を乗算しフィードバックすれば良い。このフィードバックループは駆動部の旋回方向角加速度を抑制する働きを持つ。またねじれ角度が発生すれば、駆動部の旋回角度を台車部の旋回角度に近づけ、ねじれ角度を小さくし弾性力の影響を抑制する働きを持つ。

ここで $K_n$ の最適調整について考察する。図21に式(23)をフィードバックしたシステムの根軌跡を示す。

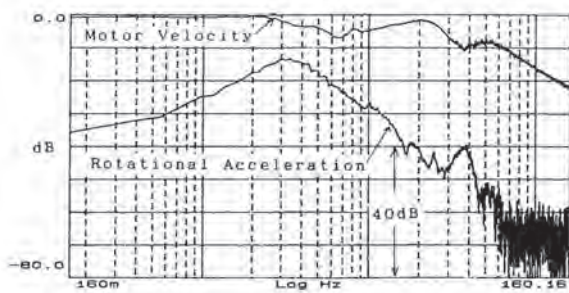


図19. 移動ロボットの周波数特性 (実測)

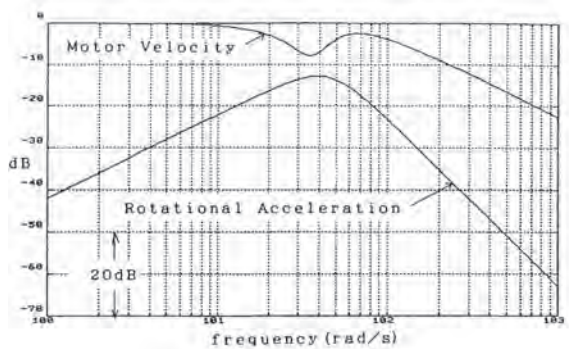


図20. 移動ロボットの周波数特性 (シミュレーション)

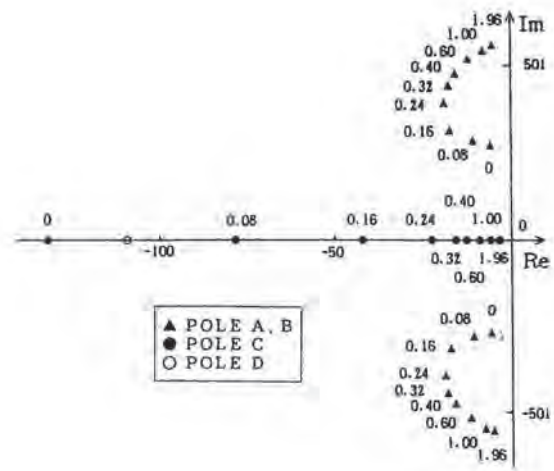


図21. 根軌跡特性

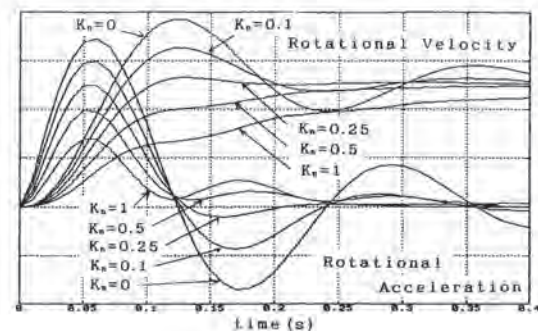


図22. ステップ応答シミュレーション

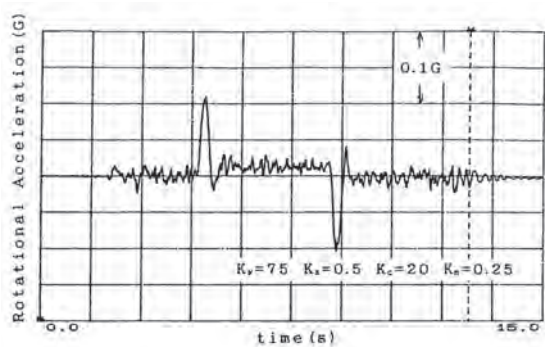


図23. 提案する方法の旋回方向振動特性

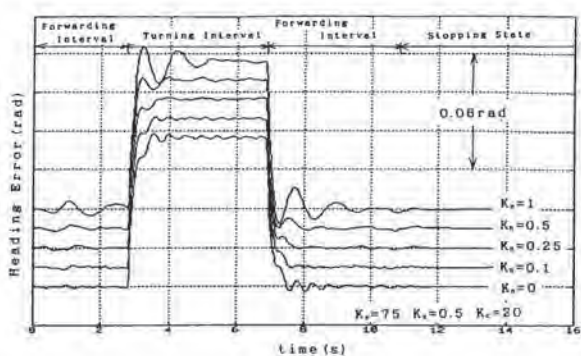


図24. 提案する方法の旋回方向偏差特性

共役根の動きから原点からの距離最大とすると  $K_n$  の最適値は0.25程度である。ステップ応答のシミュレーションを図22に示し、前記内容の妥当性が評価できた。

図23図24に試験結果を示す。図23は2カ所にピークがあるが、これは直線走行からR走行へ、R走行から直線走行に遷移する時の加速度であり機械振動ではない。図16と比較すると著しい振動抑制効果が見られる。図24は振動抑制するためのゲインが軌跡精度（方位偏差）に悪影響を与えないことが分かる。図17と比較すると高ゲインと同程度の軌跡精度を確保している。

## 4. おわりに

振動問題が発生すると、機構設計者に機械剛性を高める要求をするが、それが不可能な場合もある。高剛性化はコストや製品質量への影響もある。また再設計や調達、組立が必要で納期問題も発生する。他方、制御アルゴリズムでの解決方法は知恵とプログラム開発であり、前記問題に対応できる。全てがうまくいくとは思わないが有用な手段である。

本論文では、淡白に解決方法を記載しているが、そこに至るまでの悩みや失敗は当然あった。成功した時の喜びは今も忘れていない。また、それらが経験値となり、新

しい課題がきても、「なんとかなるさ」的気持ちにもなる。

今後とも製品開発では振動や音の問題もあろうが、我々は新しい発想で解決していくつもりである。

### 参考文献

- 1) 西井, 仮想ダンパを用いたロボットの防振制御, 日本機械学会論文集, 57巻, 536号, C編, 1991, p.1164-1169
- 2) 久良, 二見, 原, 産業用ロボットの防振制御, 安川電機技報第48巻183号, 1984, p.105-109
- 3) 西井, DSPを用いたロボットの防振制御, 第33回システム制御情報学会研究発表講演会, 1989, p.79-80
- 4) 有本, ロボット力学と制御—Ⅲ, システムと制御, Vol.29, No.10, 1985, p.671-679
- 5) 西井, 仮想ダンパを用いたロボットの防振制御, 第33回自動制御連合講演会, 1990
- 6) 西井, 福崎, 栗原, LCD ストッカの走行制御方法, TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.6, No.1, p.1-8
- 7) 小郷, 美多, システム制御理論入門, 実教出版, 1985, p.115-130
- 8) 西井, 柴谷, 鈴木, 車輪型無人搬送車の振動制御, 日本機械学会論文集, 58巻, 547号, C編, 1992, p.823-828
- 9) NISHII, Vibration Control of a Wheeled Mobile Robot Based on Disturbance Observer, 1992 JAPAN-USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, 1992
- 10) NISHII, Vibration Control of a Wheeled Mobile Robot Based on Disturbance Observer, JSME International Journal, Vol.36, No.4, 1993, p.442-447

# 亜鉛の犠牲防食作用による防錆技術の開発

Development of Anticorrosive Technology using the Sacrificial Protection Effect of Zinc

福池 裕二<sup>\*1</sup>  
Yuji FUKUIKE

当社の耐食表面処理は、水系クロムフリー塗料をコンセプトに、2000年頃より開発を開始した。チェーンが使用される環境とその構造から、薄膜で傷が付いても発錆しないことが要求され、亜鉛を必須成分とした。その結果、水中では亜鉛を安定化させ、塗膜形成後には犠牲防食作用を発揮させる技術を開発した。さらに、電気化学分析によるメカニズム解明を試みた。

From around 2000, we began to develop our corrosion resistant surface treatment based on the concept of a water-based chromium-free coating. Due to the usage environment and structure of a chain, it is demanded that the chain will not rust even if the thin film on it is damaged, so zinc was selected as an essential component. As a result, we developed a technology in which the zinc is stabilized in water and then, after the film is formed, the zinc exhibits the sacrificial protection effect. In addition, we attempted to clarify the mechanism of this through electrochemical analysis.

## 1. はじめに

当社の耐環境チェーンのひとつに「コーティングチェーン NEP 仕様ネプチューン<sup>®</sup>」がある。独自に開発した防錆塗料を塗装して販売している。

2000年頃は市販の溶剤系ウレタン樹脂塗料で塗装したチェーンを販売していた。しかし、ヨーロッパを中心に世界的に環境問題への関心が集まる中、環境にやさしい水系塗料の開発をスタートした。チェーンの構造と使用環境から亜鉛を必須成分とし、最初は一般的なプライマー<sup>\*1</sup>に上塗りを塗り重ねる塗装仕様とした。そして、商品名「NEP 仕様」として2007年頃上市した。その後、耐薬品性や防錆性の向上等の改良を行い、それに合わせて下地処理へ上塗りのみを塗装する塗装仕様へ変更した。現在の商品名は「NEP 仕様ネプチューン」である。

## 2. 水系化技術<sup>1)</sup>と防錆性

### 2.1 プライマーの開発

#### 2.1.1 課題

亜鉛は重防食塗料分野で溶剤系ジンクリッチペイントの防錆顔料として広く使われている。

亜鉛が鉄よりも先に水と反応（＝腐食）して鉄の錆び

を防ぐ防錆メカニズムは犠牲防食作用と呼ばれ、各元素間の標準電極電位の電位差から順列が決まるイオン化傾向で説明される。

亜鉛は容易に水に溶解（＝イオン化）出した後、速やかに水および酸素と反応し、亜鉛の腐食生成物である白錆を発生させる。そのため、亜鉛をそのまま水系塗料の防錆顔料とすることはできない。そこで、亜鉛顔料表面に耐水性の処理を行い、水中（＝水系塗料中）では反応を抑制し、塗膜形成後に反応性を回復させる、相反する性能を両立させることが最大の課題となった。

#### 2.1.2 亜鉛の水酸化

塗料用顔料としての亜鉛は、一部鱗片状の種類もあるが、一般的な形状は球形で、表面は不動態膜である塩基性炭酸亜鉛や分散剤等で覆われている。しかし、電位差を利用した防錆理論なので、表面の不動態膜や添加剤を剥ぎ取り、亜鉛生地を露出させて塗膜とし、より高い耐食性を目指した。

亜鉛は、金属としては比較的軟らかい性質を持つ。そこで、まず水溶性溶剤中で物理的な力によりこれらを剥ぎ取り、同時に形状も鱗片状にした。次にチオール基を有する2種類の有機化合物と、いくつかの分散剤、さらには硝酸塩を反応させ、水中で安定な亜鉛顔料を開発した<sup>2)</sup>。そして、樹脂には有機チタネートやシリコン樹脂を用いた<sup>3)</sup>。これらも水中での安定性に寄与した。

※ 1 DX・IT・研究開発センター

### 2.1.3 貯蔵安定性

塗料として一定期間安定な状態を保つことに成功はした。しかし、塗料製造から塗装までのリードタイムに対して十分ではなく、改良の余地が残った。

## 2.2 上塗りの開発

亜鉛を露出させたことで、格段に反応性は上がった。その効果は塩水噴霧試験で白錆発生量が多くなったことで確認できた。次に、長期の防錆性を得るため亜鉛の反応性を制御（＝防錆性能に応じて適切な溶解速度に調整）するための上塗りを開発した。

アルカリ性の強いアミノ基含有シリコン系化合物を樹脂とするクリヤーとした。

## 2.3 防錆性の発現

塗膜形成後に亜鉛の反応性を回復させる手段としては、高温で焼付乾燥し、有機物を除去（＝燃やして膜から取り除く）させることで可能とした。

焼付温度を上げるに従い防錆性も上がるが、チェーンの戻し温度未満に抑えねばならない。除去できないと亜鉛の反応生成物である白錆が発生せず、亜鉛の防錆性が発現しないことが目視で容易に確認できた。

これら防錆性と焼付温度の課題について、プライマーはチオール基含有有機化合物の種類と添加量、硝酸塩とのバランス、さらには製造時の反応温度を制御して解決した。上塗りも有機部分は高温焼付により除去して無機部分のみが塗膜要素となるようにした。

## 2.4 防錆性

防錆性に特化し、戻し温度を考えず、塗膜として最適な高温の焼付温度で乾燥させた時の塩水噴霧試験による防錆性の結果を図1に示す。



試験前 1000時間 2190時間

図1. 塩水噴霧試験結果

スプレー塗装のため膜厚は30 $\mu$ m以上となるが、一般的な塗膜と比較するとかなり薄い。

試験前に比べて2190時間後には白錆が僅かに流れ、赤錆は発生していない。亜鉛が適切に反応したことが分かる。

被塗物としての鉄、亜鉛、硝酸塩として添加した金属元素、上塗りの金属元素（無機部分）がネットワークを形成したためと推定している。強アルカリの上塗りを塗り重ねることにより亜鉛を溶解させたこともネットワーク形成に大きく寄与していると推定している。

## 3. 耐薬品性向上技術<sup>4)</sup>

### 3.1 塗装仕様の変更

亜鉛は両性元素で、酸にもアルカリにも容易に反応する。当初の亜鉛は前述のように反応性を大幅に上げ、さらにその他の塗膜構成成分も亜鉛の犠牲防食作用を上げる目的に特化した。上塗りもその邪魔をしないことを大前提とし、いわば腐食因子の浸入を待ち受けている状態である。

耐薬品性を上げるには、薬品を侵入させないことが最重要になる。そこで、プライマーと上塗りの役割を次のように明確に分けた。

上塗り：薬品の浸入を防ぐ。

プライマー：浸入した薬品を顔料で防ぐ。

実際には、プライマーの機能を下地処理としての亜鉛に持たせ、上塗りには架橋密度の高い樹脂と化学的に安定な顔料を配合した。

### 3.2 樹脂

一般的に耐薬品性用途には2液タイプのエポキシ樹脂を用いることが多い。架橋密度の高い強固な塗膜を形成し、腐食因子の浸入を防ぐ効果が高いためである。しかし、紫外線により劣化すること、加えて開発当時要求性能を満たす潜在性硬化剤<sup>\*2</sup>が見つからず、エポキシ樹脂は断念した。そこで、水酸基価<sup>\*3</sup>の高いアクリルポリオール<sup>\*4</sup>による2液のウレタン樹脂塗料とした。ただし、ポットライフ<sup>\*5</sup>と水系塗料の点でブロックイソシアネート<sup>\*6</sup>を配合したので、見かけ上は一液タイプである。

工場ライン塗装を行うので、ポットライフのないことが必要十分条件になる。

### 3.3 顔料

体質顔料には化学的に安定な硫酸バリウムを配合した。さらに、膜への腐食因子の浸入を完全に防ぐことはできないので、下地の亜鉛の効果補助する目的で、少量ではあるが、鱗片状亜鉛も膜の構成成分とした<sup>5) 6)</sup>。

### 3.4 亜鉛

#### 3.4.1 水系化処理

亜鉛表面を露出させることは犠牲防食作用を高める。一方、それにより薬品との反応性も上がり耐薬品性を下げる。加えて、耐水化処理は作業工程が複雑でコストアップの原因にもなる。そのため、あらかじめ鱗片状に製造されている亜鉛顔料の不働態膜や添加剤上に水系化できる処理を新たに開発した。

亜鉛に対してチオール基が有効であることは分かっているが、他社特許があり、シラン化合物のメトキシ基またはエトキシ基を加水分解させた反応性の高いシラノール基で代用した<sup>5) 6)</sup>。その結果、シラノール基が亜鉛と反応し、反対側の疎水性基部分が水の接近を防ぎ、亜鉛を水中で安定化させることに成功した。

#### 3.4.2 耐水化メカニズムの推定

原料組成から次のようなメカニズムを推定した。

1分子のシラノール基が亜鉛1原子と反応する。シラノール基1分子が反応によって占有する亜鉛上の面積に、その添加重量と分子量およびアボガドロ数から計算した個数を乗じた総面積は、亜鉛粒子の $d_{50}=20\mu\text{m}$  (カタログ値) から平均粒形を $20\mu\text{m}$ 、アスペクト比20と仮定して計算した亜鉛粒子の総表面積より大きく、亜鉛粒子表面に隙間なくシラノール基が化学結合していると推定した。計算上は十分なシラン化合物が添加されていると仮定したが、実際に水中で水との反応を抑制するには疎水性基の種類もポイントになり、2種類のシラン化合物を添加した。ガス抑制には、さらにいくつかの添加剤が必須成分となり、亜鉛表面で複雑な反応が起こっていることが示唆される。

2種類のシラン化合物による処理は塗料用アルミペースト顔料へも有効で、強アルカリの珪酸ナトリウム中でガス発生やゲル化を抑制し、1年以上に渡り安定な状態を維持できることも確認している。

### 3.5 耐薬品性試験結果

チェーンは切れると人命に関わる場合があり、当社チェーンは水素脆性の危険がある酸性雰囲気での使用は推奨していない。そのため、耐薬品性の評価は、消毒や漂白剤として使用されるアルカリ性の次亜塩素酸ナトリ

ウムとした。

浸漬試験結果を図2に示す。

次亜塩素酸ナトリウムは時間の経過とともに分解するので定期的に交換した。



当社従来品

改良品

図2. 次亜塩素酸ナトリウム水溶液浸漬試験結果

改良配合は長時間でも赤錆が発生せず、プリスター<sup>\*7</sup>もない。ブロックイソシアネートが正常に反応し、硫酸バリウムとの相乗効果により次亜塩素酸ナトリウムの浸入を防いだ結果である。浸漬した水溶液中には多量の白錆が確認できたので、亜鉛も有効に機能したことが分かった。

## 4. 防錆性向上技術<sup>7)</sup>

### 4.1 亜鉛の反応性の向上

当社表面処理の防錆機構は水系化亜鉛の犠牲防食作用にある。これまでの配合では、その亜鉛の効果をも有効に使うことに主眼を置いた。しかし、薄膜化や他社との差別化を図るため、亜鉛の効果をも高める技術開発<sup>8)</sup>を行い、より高い防錆性能を目指した。

犠牲防食作用では、異なる金属同士の電位差により卑な金属から貴な金属へ電流が環境中を伝わって流れる。そして貴な金属の腐食を防ぐことである。その効果を高めるには、電子の流れを妨げず制御することが必要になる。そのため、亜鉛顔料への耐水化処理は行わず、亜鉛は下地処理とし、その上に珪酸ナトリウムを塗り重ねることで大幅に防錆性を向上させることに成功した。

### 4.2 耐水性

珪酸ナトリウムにより塩水噴霧試験での防錆性が大幅に向上した一方、試験機内で塗膜が水に溶解する現象が見られた。これを抑えるために珪酸リチウムを併用した。

ガラス板上に任意の割合でブレンドした珪酸塩を隙間3mil<sup>\*8)</sup>のドクターブレード<sup>\*9)</sup>で塗付し、所定の焼付温度と時間で乾燥させてテストピースとした。それを室温で一定時間水に浸漬させ、水から取り出した後、テストピースに付着している水を低温で蒸発させ、試験前後の重量から膜の残存量[%]を計算した。その結果を図3

に示す。横軸が混合比、縦軸が膜の残存量を表す。

珪酸リチウム混合比が大きくなるに従い、耐水性が上がる事が分かる。加えて、耐水性に応じて耐薬品性も上がったが、防錆性は下がる傾向であった。

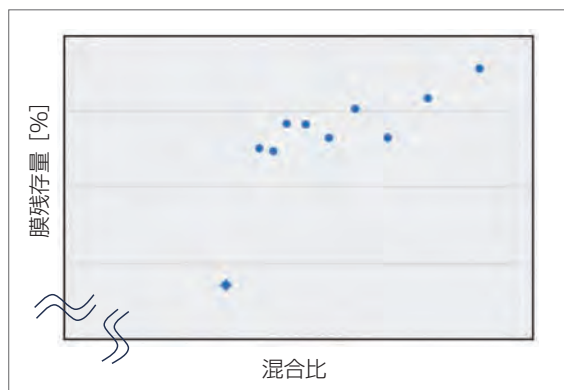


図3. 耐水性試験結果

### 4.3 塗料化

塗料の構成要素は、塗膜自体の性能を決める樹脂および顔料（前記珪酸塩と下地の亜鉛が相当）と、塗装適正に関する増粘剤やレベリング剤、消泡剤等の添加剤に分けられる。

水系塗料は主にアニオンのエマルジョン樹脂で設計される。そして、エマルジョンの安定性を担保することを主目的にエマルジョン樹脂塗料のpHは7～8程度に調整されている。塗料添加剤も同範囲での使用を想定しており、極端に高いpH > 10で使用できる添加剤はほぼない。

珪酸塩をメイン樹脂とする当社の配合ではpHが高く、塗料化へ向けて使用できる添加剤は限られた。特に塗装適正を決めるシクナー<sup>\*10</sup>の選定が難しく、アルカリ性に強いある種のシクナーのみが機能した。その他の添加剤も犠牲防食作用への影響を考慮して、最低限の種類と量しか配合していない。

珪酸ナトリウムと珪酸リチウムの混合比<sup>8)</sup>は、防錆性と耐水性（≒耐薬品性）のバランスから決定し、最終形態は顔料を配合しないクリアーとした。

### 4.4 防錆性

チェーンの戻し温度以下で焼付乾燥したときの塩水噴霧試験結果を図4に示す。現在販売中のネプチューンであるが、純粋に膜の性能を確認したため潤滑油は塗油していない。

部品で塗装し組み立てたので、ピンと外プレートおよびブッシュと内プレートの嵌合部分は塗膜に傷が付いている。膜厚は、単位表面積当たりの塗着量換算で、当社従来品

に比べ1/2～1/3程度の薄膜にした。さらに、膜厚規格自体も塗料の常識からすると桁違いに薄く設定してある。

犠牲防食作用を高めたことで薄膜でも2222時間で赤錆は発生せず、白錆が見られ、亜鉛の犠牲防食作用が有効に機能していることが確認できた。潤滑油を塗油した状態でも1000時間で赤錆は発生せず、同様に亜鉛が有効に機能していることを確認している。



図4. 塩水噴霧試験2222時間

本来、上塗りは下塗りの上に膜を形成することを一つの目的とする。しかし、これら両珪酸塩による配合は、ポラス（＝多孔性）な下地に浸透することに加え、亜鉛を溶解させ、さらにネットワークを形成するので、亜鉛の溶解速度を調整することができた成果である。

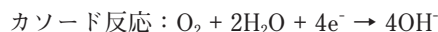
2種類の珪酸塩混合比を適切に設定し、亜鉛の溶解速度を調整して防錆性に特化すれば、さらに防錆性を向上させることができることも確認している。

## 5. 犠牲防食作用の検証

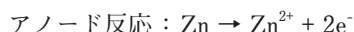
### 5.1 評価指標

金属の腐食現象は金属が溶解し電子を放出するアノード反応（酸化）と、電子を受け取るカソード反応（還元）により進行する。カソード反応では、中性、アルカリ性水溶液中では酸素が還元され、酸性水溶液中では水素が発生する反応に分かれる。

防錆性評価は中性塩水噴霧試験で行うので、次の反応が起こっている。



当社のコーティングチェーンの防錆機構は亜鉛の犠牲防食であるので、アノード反応は次になる。



犠牲防食作用は、一般的にはイオン化傾向により説明される。その指標は標準電極電位の大小である。主な金属の値 [V]<sup>9)</sup> は次になる。

$$\text{Li}(-3.045) < \text{Na}(-2.714) < \text{Zn}(-0.763) < \text{Fe}(-0.4402)$$

Zn と Fe の差は約0.32Vになる。Zn の Fe に対する犠牲防食効果は確実に発現しているので、標準電極電位を犠牲防食作用の指標とするならば、この程度の差があれば確実にと言える。

## 5.2 防錆メカニズムの検証

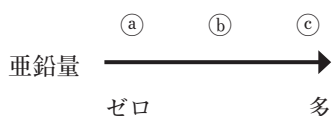
### 5.2.1 耐薬品性向上配合

下地処理の亜鉛上に硫酸バリウムと少量の亜鉛を含む絶縁性のウレタン樹脂塗料で改良したことは前述の通りである。複合塗膜としての防錆メカニズムを明確にするため分極測定を行った。その結果を図5に示す。

図中 O<sub>2</sub> で示す値は酸素の還元電流密度を示す。凡例①～④の塗装仕様と上塗りの亜鉛量、防錆性の関係は次の通りで、亜鉛の配合量に応じて赤錆発生までの時間が長くなっていることが分かる。

#### 塗装仕様

下地処理	上塗り	防錆性
① 亜鉛	なし	100時間
② 亜鉛	塗料(a)	260時間
③ 亜鉛	塗料(b)	950時間
④ 亜鉛	塗料(c)	1400時間



自然電位は①下地処理が最も卑になる。しかし①～④の差は0.1V未滿に収まり、0.32Vの差を目安とすると自然電位で防錆性の相対評価を行うことはできない。

カソード反応については、配合間で電流密度の差が小さく優位な差と見ることは難しい。全配合とも酸素の還元による電流密度に近い。下地処理との関係では、②～④により①の亜鉛のカソード反応が抑制されていることが分かる。

アノード反応も塗膜により抑えられていることが分かる。各配合間の差は小さく優位差は見られない。

塗膜には必ずピンホールがあり、吸水性もある。有機樹脂による塗膜は絶縁性であるが電気が通っていることから、水が下地まで浸入していると仮定できる。そこで

反応が下地の亜鉛表面で起こっていると考えると、電流は全て酸素の還元による電流密度になるはずで、カソード反応の実測値が酸素のそれに近いことと一致する。

絶縁膜を塗り重ねてはいるが、亜鉛による犠牲防食作用であることは確認できた。

①～④の防錆性の差は顕著である。しかし、本測定条件ではその差を評価することができなかったが、塗膜により亜鉛の反応が抑制されていることが確認できた。

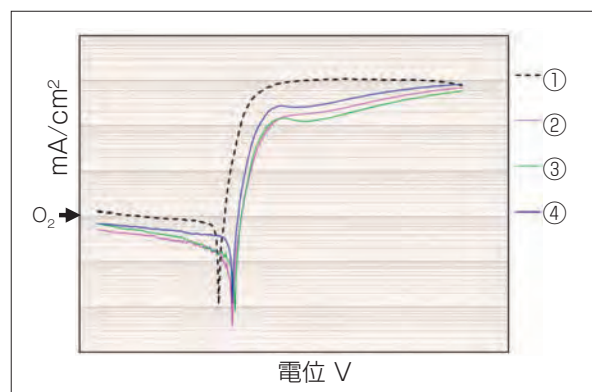


図5. 耐薬品性配合の分極測定結果

### 5.2.2 防錆性向上配合

珪酸ナトリウムと珪酸リチウムを混合し、上塗りとして塗装することで、下地の亜鉛の犠牲防食作用を高め、大幅に防錆性を高めたことは前述の通りである。その分極測定結果を図6に示す。

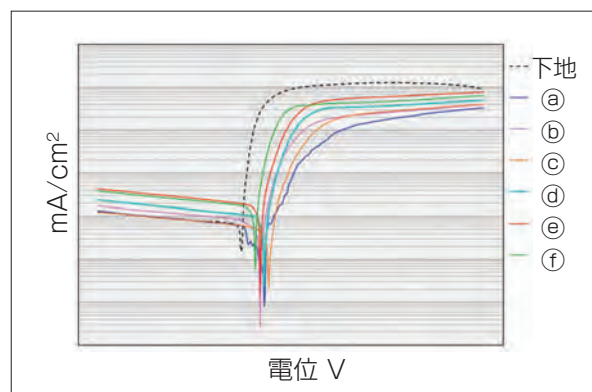
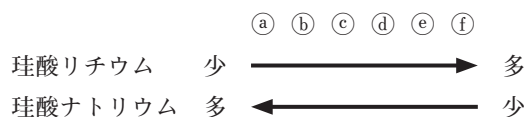


図6. 防錆性改良配合の分極測定結果

グラフ中凡例 a～f の配合概要は次の通りである。



塩水噴霧試験による防錆性は、下地処理の上に①～⑥を塗装し評価した。大幅な性能向上と混合比により防錆性が大きく異なることを確認している。

下地を基準とすると、①～⑥の自然電位は全て貴側へシフトしている。シフトした値は小さく、下地処理も含め①～⑥は0.1Vの範囲に収まっている。同様に0.32Vを目安と考えるとイオン化傾向としての有意差を表さないとと言える。

アノード反応は概ね混合比の通りに並んでいる。全ての配合は下地に比べて小さい値になるが、配合間の差は小さく有意差があるとは言えない。ただし、下地との比較では全配合で2倍以上の違いがあり、有意差があると言える。そのため、下地の亜鉛のアノード反応が①～⑥によって抑えられていることが分かる。

カソード反応は、①～⑥によって抑えられていないが、電流密度の差が小さく優位差はないと考える。各配合間の差も同様に優位差はない。

### 5.3 検証結果

今回の実験条件では、亜鉛と鉄の電位差0.32Vを目安とすると、一般的に認識されている自然電位の差で、防錆性の優劣は評価できなかった。しかし、アノード反応またはカソード反応の電流密度では、防錆性に与える影響の大小までは判別できなかったが、亜鉛の反応性を抑制できている傾向は把握できた。

### 5.4 結論

電気化学分析の表面処理への応用は、原理的には可能である。まだまだ検討の余地があるが、金属バルクへの適用が一般的な電気化学分析を表面処理へ展開できることが分かった。

## 6. おわりに

チェーンの構造と使用環境から亜鉛を必須成分として水系クロムフリー耐食表面処理を開発した。

水と容易に反応する亜鉛を水中で安定化させるためには、数多くの試作を繰り返し、発熱や水素ガス発生等、実験には細心の注意が必要であった。水系塗料化できる亜鉛開発には成功したが、高い焼付温度が必須であるため、他の金属防錆用途へ単純に展開することは難しい。今後は低温焼付化や、延いては常温乾燥が最終目標になるはずである。

珪酸塩でのトップコート開発は、混合比の調整で、従来技術にはない高い防錆性を得ることができた。

### 参考文献

- 1) 福池裕二, コーティングチェーン NEP 仕様の開発 TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.17, No.1, 2007, p.1-6
- 2) 福池裕二, 水系防錆顔料, 水系防錆塗料および高耐食表面処理チェーン, 特許第4869349号, 2011-11-25
- 3) 福池裕二, 高田智英, 佐藤哲, 水系塗料組成物, 特開2008-143945, 2008-6-26
- 4) 有馬愛子, コーティングチェーン「ネプチューン®」の開発 TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.25, No.1, 2015, p.1-6
- 5) 有馬愛子, 福池裕二, チェーン, 特許第5843917, 2015-11-27
- 6) 有馬愛子, 福池裕二, チェーン, 特許第5871990, 2016-1-22
- 7) 萱原千景, コーティングチェーン NEP 仕様ネプチューン® TSUBAKI TECHNICAL REVIEW, Vol.33, No.1, 2023, p.1-4
- 8) 福池裕二, チェーン, 特許第7211545, 2023-1-16
- 9) 田村英雄, 松田好晴, 現代電気化学, 1985年発行, p.55

### 用語解説

#### \* 1 プライマー

下塗り。鉄等の金属に塗装する時、錆止めとして最初に塗装する塗料。

#### \* 2 潜在性硬化剤

熱や光等の外部刺激により活性となる硬化剤。室温では安定。

#### \* 3 水酸基価

試料中の水酸基の含有量を表す指標。試料1gに含まれる水酸基をアセチル化するために要した酢酸を中和するのに要する水酸化カリウムの量をmgで表したもの。大きいほど、イソシアネートとの反応で架橋密度が大きくなる。

#### \* 4 アクリルポリオール

分子中に水酸基を含有し、ウレタン樹脂の主剤として用いられるアクリル樹脂。

#### \* 5 ポットライフ

主剤、硬化剤の混合後、塗装作業に支障なく使用可能な時間。

#### \* 6 ブロックイソシアネート

熱等の外部刺激によりブロック化剤が解離し、イソシアネート基が生成する化合物。外部刺激を与えない限り反応性がないため、水酸基を持つ化合物と混合しても安定。ウレタン樹脂の潜在性硬化剤として用いられる。

#### \* 7 ブリスター

膨れ。

#### \* 8 mil

ヤードポンド法の長さの単位。1 mil=約25.4μm。

#### \* 9 ドクターブレード

簡易的に、一定厚さで塗膜を得るための塗装治具。

#### \* 10 シックナー

増粘剤。塗料の粘弾性を付与する添加剤。鋳物系、アクリル系、ウレタン系、セルロース系などがあり、貯蔵中の沈殿抑制や塗装方法による仕上がり感に応じて使い分ける。

# 鉄鋼部品への熱処理について ～浸炭焼入れ、高周波焼入れ、窒化処理～

Heat Treatment for Steel Parts: Carburizing and Quenching, Induction Hardening and Nitriding

堀野 孝<sup>\*1</sup>

Takashi HORINO

自動車や産業機械等で用いられる鉄鋼部品では、熱処理は所要の強度や機能を付与する上で欠かせない技術である。熱処理により、鉄鋼部品には所望の硬さや強度、韌性<sup>\*1</sup>が付与される。つばきグループでは、部品表面を硬化させる表面硬化熱処理を用いており、具体的にはチェーン部品には浸炭焼入れ、スプロケットには高周波焼入れを施している。本稿では、表面硬化熱処理の中で代表的な浸炭焼入れ、高周波焼入れ、窒化処理について技術解説を実施する。

Heat treatment is an essential technology to provide the strength and functionality required for the steel parts used in applications such as automobiles and industrial machinery. Heat treatment can give steel parts the desired hardness, strength, and toughness<sup>\*1</sup>. The Tsubaki Group uses surface hardening heat treatment to harden the surface of parts. Specifically, we use carburizing and quenching for chain components, and induction hardening on sprockets. This report explains the technology for carburizing and quenching, induction hardening, and nitriding, which are representative examples of surface hardening heat treatments.

## 1. はじめに

「熱処理」と聞いて、まず何を思い浮かべるだろうか。用語辞典で調べてみると、「材料に加熱と冷却を施すことで、材料の性質を変化させること」とある。また、日本金属熱処理工業会では「赤めて冷やす<sup>1)</sup>」と定義しており、「金属材料に加熱と冷却の組み合わせによって製品の形を変えることなく性質を向上させる加工技術」と説明している。熱処理の代表的なものとして、金属材料への焼入れや焼戻し等が挙げられるが、広義的には食品や飲料の加熱殺菌処理、ガラスの強化処理等も熱処理に含まれる。

金属熱処理の中で、最も知られているのは日本刀の焼入れである。これは平安時代後期に確立された技術の一つで、刀匠の長年の修行に裏付けられた高度な技術を用いる大変精緻な作業である。作刀工程において、800℃程度の高温に熱した刀身を水中にて急冷する工程が「焼入れ」であり、刀の品質や特性に重要な役割を果たす。焼入れの際には、刀身の温度と冷却速度（焼刃土の状態）が大変重要であり、これらをシビアに調整することで、刀身の硬さや韌性が決定される。この焼入工程によって、日本刀は非常に鋭い切れ味と強度、韌性が両立

することから、現代では「焼きを入れる」として、鍛錬や訓練を厳しく行う意味の慣用句となっている。

鉄鋼材料では、900℃前後の高温まで加熱した後に冷却することで金属組織を相変態させることで、所望の硬さや強度等を得ることができる。鉄鋼材料は熱処理により特性を大幅に変化できる材料の代表であり、処理条件によっては軟らかくにも硬くにもすることができる。そのため、熱処理は鉄鋼材料の性能および機能の向上に不可欠な技術であり、その中でも表面硬化熱処理は、運搬・搬送機械や建設機械、産業機械、工具等の鉄鋼部品に所望の硬さや強度、韌性が付与できる重要な処理法である。これにより、鉄鋼部品の高強度化や耐摩耗性および耐疲労強度の向上が図られ、部品の小型化、長寿命化等に大きく貢献している。

本稿では、表面硬化熱処理として産業界で広く利用され、最も代表的である浸炭焼入れ、高周波焼入れ、窒化処理に焦点を当て、それぞれの原理やプロセス、技術特長、適用例の紹介を行う。

## 2. 金属熱処理の分類と種類

図1に金属熱処理の分類と種類を示す<sup>2)</sup>。金属熱処理には数多くの種類があるが、全体熱処理と表面熱処理に大別される。以下にそれぞれについて説明する。

※1 DX・IT・研究開発センター DX 技術開発部



サイト\*<sup>3</sup>組織に、内部は比較的軟らかく韌性を保持したフェライト・パーライト組織もしくは低炭素マルテンサイト組織となる。通常は、焼入れの後に焼戻しを実施する。

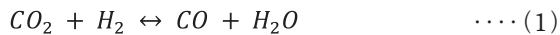
## 4.2 適用材料

浸炭焼入用の鋼材としては、機械加工性や内部韌性の確保から低炭素鋼（業界では肌焼鋼と呼ばれる）を基本とし、油浸漬冷却でも表面層がマルテンサイト組織となるようにMnやCr、Mo等を適量添加した合金鋼が使用される。JIS規格の中で代表的な鋼種はSCr420HやSCM420Hとなる。

## 4.3 浸炭方法

### 4.3.1 ガス浸炭法

最も工業的に幅広く適用されている浸炭法である。炭化水素ガス（メタン、プロパン、都市ガス等）を主原料として、ガス変成炉内において高温のニッケル触媒中で部分燃焼させて生成した吸熱型変成（RX）ガスを浸炭性ガスとして用いる。以下の式(1)に示すブードア反応により、鋼材表面に炭素が供給される。



炭素濃度制御が容易であることや、均一浸炭が得られること、自動化による連続生産が容易であることから、自動車部品等の大量生産に適した処理法である。

### 4.3.2 真空浸炭法

高温の真空（減圧）炉中で炭化水素ガス（メタン、プロパン、アセチレン等）を浸炭性ガスとして導入し、鋼材表面と浸炭ガスの接触分解により炭素を供給する浸炭法である。ガス浸炭法よりも高温で浸炭が可能のため処理時間が短く、粒界酸化や不完全焼入れが抑制される等の特長を有する。複雑形状部品への浸炭が可能であることや、CO<sub>2</sub>排出量が少なく環境負荷も小さいことから、近年普及が進んでいる。しかし、雰囲気制御がシビアなため、炭素濃度管理が難しい等の課題も存在する。

### 4.3.3 その他の処理法

減圧下でのグロー放電プラズマにより浸炭イオンを鋼材表面に衝突させるプラズマ浸炭法や、炭素含有材料と活性化剤の混合物中に被処理品を埋め込み、密閉容器内で加熱する固体浸炭法、塩浴中に被処理品を浸漬させて処理する液体浸炭法、高温炉中に液体炭素源を直接滴下させる適下浸炭法等が存在する。

## 4.4 設備構成

浸炭焼入炉は、熱処理仕様や生産形態等に応じてさまざまな形式があり、それぞれに特長と適用可能領域がある。

代表的なものとして、バッチ式炉、連続炉が挙げられる。バッチ式炉は生産の柔軟性と品質の均一性に優れ、多品種少量生産に適する。連続炉は、処理物の自動搬送機構を有しており、自動車部品等の大規模・大量生産に対応できる。図2につばきグループで使用しているメッシュベルト式ガス浸炭連続炉の構成例を示す。この他にも、プッシュャー炉、ロータリー炉、流動床炉等もあり、炉型ごとに昇温時の熱伝達効率や雰囲気制御性、冷却方法が異なる。

設備選定に際しては、部品形状や材質、要求品質、生産規模・処理量だけでなく、熱処理品質の再現性や設備保守性、自動化レベル、エネルギー効率、環境負荷等を総合的に評価して最適設備を決定する必要がある。

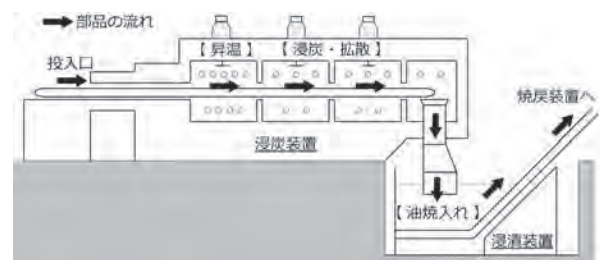


図2. メッシュベルト式ガス浸炭連続炉装置の構成例

## 4.5 浸炭焼入れの適用例

- ・自動車部品：変速機用歯車、シャフト、軸受等
- ・建設機械部品：歯車、ピン、ブシュ、ローラ等
- ・産業機械部品：歯車、ピニオン、軸受け、カム等
- ・工具・金型：各種治具、プレス金型等

# 5. 高周波焼入れ

高周波焼入れは、誘導加熱（IH:Induction Heating）による急速加熱と噴射冷却等による急速冷却を組み合わせた熱処理法である。短時間での部分加熱および表面加熱による表面焼入処理のため、高い表面硬さや低い熱処理変形、高い表面圧縮残留応力の付与、組織微細化による高韌性化、単品処理による自動インライン化が可能等の優れた特長を有しており、自動車や建設機械、工作機械等の鉄鋼部品の耐摩耗性や耐疲労強度の向上を目的として使用されている。また、電気エネルギーによる直接加熱のため加熱温度や加熱時間の制御が容易であり、エネルギー効率が良くCO<sub>2</sub>排出量が少ない熱処理法として注目されている。

## 5.1 高周波焼入れの原理

### 5.1.1 加熱方式

加熱手段には電磁誘導現象を利用した誘導加熱を用いることで、被加熱物表面をオーステナイト変態点以上に短

時間に昇温できる。銅製の加熱コイルに高周波電流を流すと周囲に交番磁束が発生し、その中に被加熱物を配置すると最表面にうず電流が発生して、そのジュール熱による自己発熱で非接触ながら急速かつ短時間に昇温できる。図3に円柱部品を4巻の加熱コイルで加熱した場合を示す。

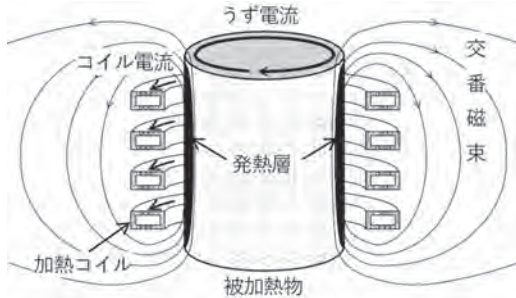


図3. 誘導加熱の原理<sup>4)</sup>

高周波電流には、周波数が高いほど表面近くにうず電流が集中する表皮効果があり、周波数が発熱深さを決める重要な要素である。最表面のうず電流密度が $1/e$ （約37%）に減少する深さを電流透過深度 $\delta$ として式(2)で与えられる。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad \dots (2)$$

ここで、 $\sigma$ ：導電率 [ $1/(\Omega \cdot m)$ ]、 $\mu$ ：透磁率 [H/m]、 $f$ ：周波数 [Hz] である。

また、近接効果により加熱コイル形状によって被加熱物の発熱部位が決定されるため、基本的に加熱コイルは被加熱物形状に合わせて一品一様で設計製作される。

### 5.1.2 冷却方式

鉄鋼部材を高温まで昇温させた後、直ちに急速冷却を実施する。冷却方式にはいくつかの手法があるが、強冷却が必要であることから噴射ジャケットを用いた噴射冷却を主として使用する。そのため、噴射ジャケットも被冷却物形状に合わせた設計製作が必要となる場合がほとんどである。焼入液には、変形量低減と焼割防止のため、高分子ポリマーを添加した水溶性冷却剤を主として使用する。その濃度や液温、噴射量、噴射角度を管理、制御することで、安定的に高い冷却速度を得ることができる。

### 5.2 高周波焼入れの方法

焼入方法には定置焼入れと移動焼入れの2種類がある。定置焼入れは別名一発焼入れと呼ばれており、部品と加熱コイル、噴射ジャケットを固定のまま加熱冷却を実施する方法であり、小型部品や単純形状部品等に適用している。一方、移動焼入れは、部品もしくは加熱コイルと噴射ジャケットを並行移動もしくは回転運動させなが

ら部分的に加熱冷却を行う方式である。この方式は、大型部品や長尺部品等の焼入れに最適である。

### 5.3 適用材料

高周波焼入れは、鉄鋼部材の母相炭素濃度をそのまま利用するため、一般的には安価な中炭素鋼への適用が多いが、クロムモリブデン鋼や軸受鋼、鋳鉄等にも適用される。

### 5.4 設備構成

図4に高周波焼入設備の構成を示す。高周波電源は、商用電力から所定の高周波電力を発生させる装置であり、誘導加熱には欠かせないものである。一般的には、周波数は3～200kHz、出力は数10～数百kWである。電源形式はトランジスタ式が主流であり、近年の半導体素子の進化発展により電源単体での変換効率率は95%に達する。

焼入装置は、加熱冷却や搬入搬出を含めた機械的動作を自動化するものであり、装置制御盤にてデジタル制御を実施する。装置構成は部品形状や生産性等により千差万別であるが、自動製造ライン専用機としてインライン処理対応が必要な場合には一品一様で設計製造する場合が多い。

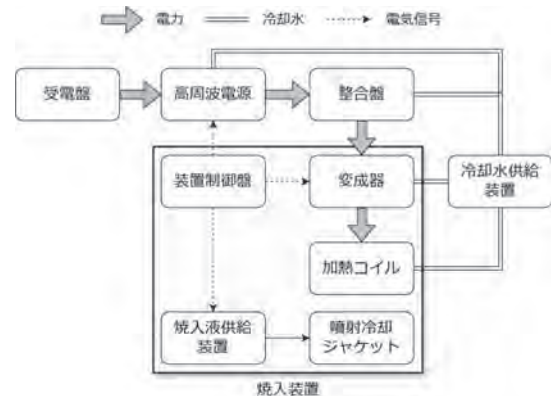


図4. 高周波焼入設備の構成<sup>5)</sup>

### 5.5 高周波焼入れの適用例

- ・自動車部品：駆動系シャフト、ハブ軸受等
- ・建設機械部品：スプロケット、ローラ、ピン等
- ・工作機械部品：レール、ガイド、ラック等
- ・産業機械部品：ローラ、シャフト、ギア等

## 6. 窒化処理

窒化処理は、鉄鋼部材の表面から拡散浸透させた窒素により表面層を硬化させ、表面機能として耐摩擦摩耗性や耐腐食性、高い疲労強度等を付与する熱処理法である<sup>6)</sup>。比較的低温処理のため熱処理変形が極めて少なく、環境負荷低減が可能等の優れた特長を有する。また、熱軟化

特性にも優れ、高温や高負荷環境下で使用される部材に最適である。そのため、加工寸法精度が要求される精密部品や金型、治工具等に幅広く適用されている。

## 6.1 窒化処理の原理

窒化処理は、鋼材表面から活性窒素原子を内部に拡散浸透させることにより、表面層のみを硬化する処理法である。オーステナイト変態温度以下の比較的低温（450～600℃）での処理で金属組織の相変態を伴わないため、熱処理変形が極めて少ないという特長を持つ。しかし、硬化層深さにおいては他の表面硬化熱処理より大きく劣るため、強度が必要な部品への適用には注意が必要である。

## 6.2 適用材料

窒化処理に用いられる鋼材としては、ステンレス鋼や工具鋼、機械構造用鋼の他に JIS 規格として窒化用鋼 SACM645材が挙げられる。

## 6.3 窒化処理の方法

### 6.3.1 ガス窒化法

最も一般的な窒化法であり、大気圧下の処理炉内にアンモニアガスを導入し、式(3)に示す熱分解にて生じる活性窒素原子を鋼材表面に吸着させて、表面から内部へ浸透拡散させる手法である。



窒素は鋼材内部の合金元素と反応することで、高い硬さを有する窒化層が生成される。窒化層は化合物層と拡散層から構成される。鋼材の最表面には鉄窒化物からなる極めて硬い化合物層が形成される。化合物層の硬さは合金鋼の場合で1,000～1,200HVに達するが、処理条件によってはボイドが生成する場合がある。次に化合物層の内部には、母相中の合金元素と結合した緻密な窒化物が析出した拡散層が形成される。その厚さは窒素の拡散に律速されるため、保持時間の1/2乗に比例する。また処理温度が上昇すると窒素の拡散が促進され、より厚い拡散層が得られる。

窒化雰囲気は、窒化ポテンシャルと温度からレーラー図を用いて、目標とする窒化層の化合物構成になるように調整する。ガス窒化は他の窒化法と比べて処理時間がより必要であるものの、それに応じた厚い窒化層が得られる。

### 6.3.2 プラズマ窒化法

真空（減圧）炉内に窒素と水素を主体とした混合ガスを雰囲気として導入し、直流グロー放電にて生じた窒素イオンを鋼材表面に高速で衝突させて拡散浸透させる処理法である。従来のガス窒化法と比べて処理時間が短

く、混合ガス組成の調整で窒化層のみを生成することが容易である他、環境負荷も小さいという利点がある。しかし、部品形状が複雑な場合、窒素プラズマの不均一集中が発生し、均一な処理が難しい場合がある。

### 6.3.3 その他の処理法

塩浴中に被処理品を浸漬させる塩浴窒化法やガス浸透窒化法等がある。また類似の処理法としては、窒素と炭素を鋼材表面から同時に侵入させる軟窒化法が存在する。

## 6.4 設備構成

窒化処理炉としては、主にバッチ式炉、ピット炉、連続炉、真空プラズマ炉に分類される。バッチ式炉は汎用性が高く、さまざまな部品形状に対応可能であるが、大量生産には不向きである。ピット炉は、シャフト類や長尺部品の処理に適しており、処理の均一性に優れる。連続炉は自動搬送装置による大規模生産に対応可能である。真空プラズマ炉は、精密部品や高合金鋼への適用が多い。

設備選定に際しては、処理品質、設備コスト、生産性等を総合的に判断していく必要がある。

## 6.5 窒化処理の適用例

- ・金型：ダイカスト金型、プレス金型、鍛造金型等
- ・工具部品：切削工具、治具等
- ・自動車部品：バルブ、カムシャフト、高精度歯車等
- ・産業用部品：シャフト、バルブ、シリンダ等
- ・その他部品：航空宇宙、精密機械、医療機器等

## 7. 浸炭焼入れ・高周波焼入れ・窒化処理の比較

表1に浸炭焼入れ、高周波焼入れ、窒化処理の主な特徴を、図5に鉄鋼部材表面からの硬さ分布のイメージ図を示す。これらの特徴を十分に理解した上で、最適な処理法を選択することが重要である。

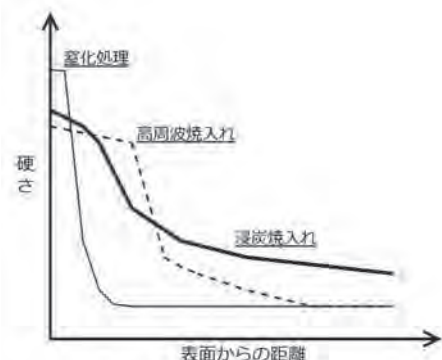


図5. 鉄鋼部材表面からの硬さ分布のイメージ図

表1. 各表面硬化熱処理の主な特徴

項目	浸炭焼入れ	高周波焼入れ	窒化処理
処理温度	850～950°C(ガス浸炭) 900～1050°C(真空浸炭)	850～1,050°C程度 (材質や硬化深さによる)	450～600°C程度
硬化層深さ	0.5～2.0 mm程度	0.5～5.0 mm程度(材料により5.0mm以上可能)	0.1～0.2mm程度
処理時間	数時間	数秒～数十秒(大型部品の場合は数分)	数時間～数十時間
主な焼入方法	油浸漬冷却	ポリマー水溶液もしくは水による噴射	なし
表面硬さ	高い(表面炭素量0.8%で800HV程度)	比較的高い(0.55%炭素鋼で700HV程度)	非常に高い(1,000～1,200HV)
熱処理変形	歪みが比較的大きい	比較的少ない	非常に少ない
主な適用材料	低炭素鋼, 低炭素合金鋼	中炭素鋼, 中炭素合金鋼など	窒化鋼, 工具鋼, ステンレス鋼など
主な適用部品	<b>つばきグループ製品</b> チェーン部品: プッシュ、ローラ、ピンなど <b>一般製品</b> 自動車: 変速機用歯車, シャフト, 軸受など 建設機械: 歯車, ピン, プッシュ, ローラなど 産業機械: 歯車, ピニオン, 軸受け, カムなど 工具・金型: 各種治具, プレス金型など	<b>つばきグループ製品</b> 歯車部品: ピニオン, スプロケットなど <b>一般製品</b> 自動車: 駆動系シャフト, ハブ軸受など 建設機械: スプロケット, ローラ, ピンなど 工作機械: レール, ガイド, ラックなど 産業機械: ロール, シャフト, ギアなど	<b>一般製品</b> 金型: ダイカスト金型, プレス金型, 鍛造金型など 工具: 切削工具, 治具など 自動車: バルブ, カムシャフト, 高精度歯車など 産業用: シャフト, バルブ, シリンダーなど その他: 航空宇宙, 精密機械, 医療機器など

新たな研究開発として、真空浸炭と高周波焼入れの複合処理<sup>7)</sup>や、塩浴軟窒化と高周波焼入れの複合処理<sup>8)</sup>等、単一部品に複数の熱処理を適用することで、さらなる高機能化を狙った事例があり、一部は実用化されている。

## 8. おわりに

本稿では、表面硬化熱処理の中で代表的な処理法である浸炭焼入れ、高周波焼入れ、窒化処理について詳細を紹介した。実際にどの処理法を選択するかは、それぞれの原理や特長、適用範囲を十分に理解した上で、対象部品の要求性能や使用環境、形状、材質、生産コスト等を総合的に考慮して決定する必要がある。

金属熱処理は、材料技術や設備技術の進歩とともに進化を続けてきており、今後もCO<sub>2</sub>排出量低減による環境負荷低減や処理能力の向上、省エネルギー化等の観点から、技術革新が進むと考えられる。特に設備IoTによるリアルタイムモニタリング技術やAI・機械学習による予防保全・予知保全技術、熱処理シミュレーションを活用した最適品質の予測技術等、これらをさらに進化発展させ活用することで、生産プロセスの効率化や品質の向上が期待される。

最後に、本稿を通じて表面硬化熱処理への理解をさらに深め、知見を広げてもらうことで、適切な活用および新たな技術開発の一助となれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本金属熱処理工業会, 金属に命を吹き込む熱処理技術, 説明パンフレット, p.2
- 2) 日本熱処理技術協会・日本金属熱処理工業会, 熱処理技術入門 大河出版, 2004
- 3) 例えば 内藤武志, 浸炭焼入れの実際 第2版, 日刊工業新聞

社, 1999

- 4) 堀野孝, 高周波焼入れシミュレーションによる熱処理変形と残留応力の予測技術に関する研究, 茨城大学博士論文, 2015, p.29
- 5) 日本熱処理技術協会, 熱処理技術便覧, 日刊工業新聞社, 2000, p.272
- 6) 例えば ディーター・リーケトほか, 鉄の窒化と軟窒化, 平河工業社, 2011
- 7) 大林巧治, 熱処理技術と自動車部品の進化 一究極のものづくりを目指して一, 熱処理, 54, 3, 2014, p.110
- 8) K. Fukazawa, Y. Misaka, K. Kawasaki, Y. Ikezawa, T. Konishi and M. Beppu: Proc. European Conference on Heat Treatment and 21st IFHTSE Congress, Munich, Germany, 2014, p.81

### 用語解説

#### \* 1 韌性

材料が外力や衝撃を受けて破壊されるまでの抵抗力で、材料の「ねばり強さ」を表す。

#### \* 2 オーステナイト

鉄鋼材料を高温まで加熱すると得られる組織。面心立方格子構造で非磁性体。常温よりも炭素を多く固溶できる。

#### \* 3 マルテンサイト

オーステナイト組織を急冷(焼入れ)すると得られる組織。体心正方格子の中に炭素が侵入した固溶体で強磁性体。非常に硬いが脆い組織なので、焼戻しが必要な場合が多い。