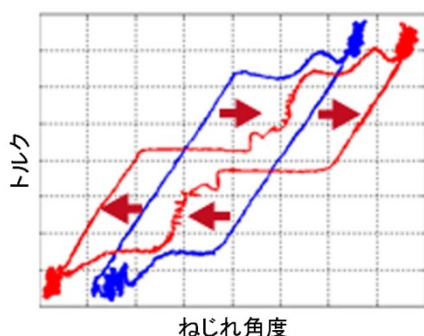


# 位相面からの図形情報に着目した 機械特性の可視化とパラメータ推定

Visualization and Parameter Estimation for Machine Characteristics using Phase Planes



加藤 義樹\*<sup>1</sup>  
Yoshiki Kato

栗屋 伊智郎\*<sup>2</sup>  
Ichiro Awaya

望月 慶佑\*<sup>3</sup>  
Keisuke Mochizuki

精密な機械制御を行う製品では、バックラッシュ、摩擦、剛性などの機械特性を正確に把握することが求められる。本稿では、機械の稼動データを利用して、縦軸・横軸に応答を描き(位相面)、その軌跡が描く特徴的な図形から機械の特性を可視化することで、機械の状態を一目で把握できる診断技術について述べる。本手法は、異常検知やヘルスマonitoringのみならず、出荷時の正確な機械調整、制御系設計におけるモデルベース開発など、広い範囲での応用が可能である。

## 1. はじめに

産業界では、高性能・高信頼性のモノづくりの後に続くお客様メリットとして、故障する前に異常の予兆を検知して交換するサービスが注目されている。近年では、特に、ICTの進歩により、遠隔地からの稼動データ転送が低コストで行えるようになった。これに呼応するように、ヘルスマonitoringや異常検知サービスが注目されるに至り、多くの手法が提案されている。

異常の予兆を捉えることができれば、事前に部品交換を行うサービスなど、稼動率を向上させることができるため、わずかな変化を如何に検知できるかが、異常検知技術では重要になっている。異常検知では、データ分析を主体にするデータベースアプローチと、製品の数式モデルをベースにするモデルベースアプローチの、2つの流れがある<sup>(1)</sup>。

これら2つは、それぞれ一長一短があり、目的や条件に応じて、使い方を検討する必要がある。当社では、この2つを組み合わせた手法として、位相面法を開発した。

位相面法は、複数の種類の稼動データを2つの組合せに分け、縦軸と横軸に同じ時間ごとのデータをプロットして得られる形状に着目した手法である。機械にわずかな変化が生じたとき、時間応答における変化では同じような応答波形になり、見分けることが困難なケースは多いが、位相面上では、わずかな変化でも図形的に拡大できる効果があり、形の違いから機械の特性変化、すなわち、予兆となる変化を捉えることができる。位相面法では、第一ステップとして、位相面による図示化(可視化)を行い、変化の有無を判断する。次の第二ステップでは、なぜ、その形になるのかを製品の数式モデルと対応させて、その変化がどの物理パラメータなのかを明らかにし、定量的に判断する。このように、位相面法は、機械の状態を定性、定量の両面から診断できる手法である。

\*1 ICTソリューション本部システム技術開発部 主席技師  
\*3 ICTソリューション本部システム技術開発部

\*2 ICTソリューション本部システム技術開発部 課長 工博

本稿では、2章で、対象とする機械駆動系について述べ、3章では、複数の位相面を作成することで機械特性を多面的な可視化が可能なることを示す。4章では、数式モデルと対応させて図形の形状から物理パラメータを推定する手法について詳述する。5章では、実験装置を利用して位相面による可視化の有効性を示す。

## 2. 対象とする機械駆動系のモデル

対象とする機械駆動系は、モータと負荷の間にバックラッシュと剛性が存在し、かつ、モータ側・負荷側それぞれに非線形摩擦が作用する系である。この駆動系の一般的なモデルは、2慣性系モデルで表すことができる。図1に2慣性系モデルを示す。

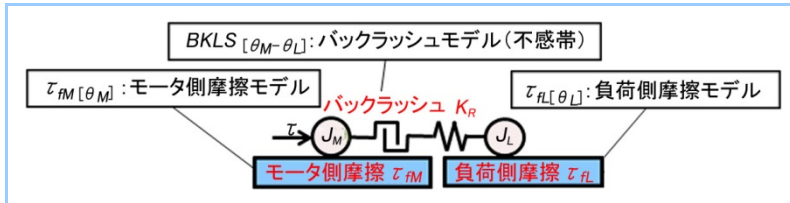


図1 2慣性系モデル

2慣性系モデルにおいては、ギアやボールねじ等の伝達要素は全てモータ軸換算とし、バックラッシュは不感帯で、剛性は2慣性間のねじれ剛性でそれぞれ表す。なお、モータ側と負荷側に働く摩擦はGMSモデル<sup>(2)</sup>で表されるものとする。GMSモデルは、従来の速度依存型モデルを改良したモデルであり、速度切り替わり時の微小な運動時の摩擦変化を説明できるモデルである。

2慣性系モデルの運動方程式をラプラス変換したものを式(1)(2)で表す。図2に2慣性系モデルのブロック図を示す。

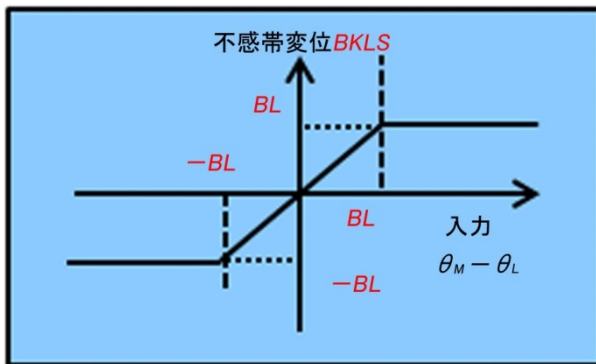


図2  $BKLS[\theta_M - \theta_L]$  のモデル

$$(J_M s + D_M) s \theta_M = \tau - \tau_{fM}[\theta_M] - K_R \cdot (\theta_M - \theta_L - BKLS[\theta_M - \theta_L]) \quad (1)$$

$$(J_L s + D_L) s \theta_L = -\tau_{fL}[\theta_L] + K_R \cdot (\theta_M - \theta_L - BKLS[\theta_M - \theta_L]) \quad (2)$$

ここで、 $\tau$ :トルク指令 [Nm],  $\omega_M$ :モータ角速度 [rad/s],  $\omega_L$ :負荷角速度[rad/s],  $\theta_M$ :モータ角度 [rad],  $\theta_L$ :負荷角度 [rad],  $\tau_{fM}$ :モータ側摩擦 [Nm],  $\tau_{fL}$ :負荷側摩擦[Nm]であり、パラメータは、 $J_M$ :モータ側イナーシヤ [kg・m<sup>2</sup>],  $J_L$ :負荷側イナーシヤ [kg・m<sup>2</sup>],  $D_M$ :モータ側粘性係数[Nm・s/rad],  $D_L$ :負荷側粘性係数 [Nm・s/rad],  $K_R$ :ねじれ剛性係数 [Nm/rad],  $D_R$ :ねじれ粘性係数 [Nm・s/rad],  $BL$ :バックラッシュ不感帯幅(片側)[rad],  $\tau_{fM0}$ :モータ側摩擦(飽和) [Nm],  $\tau_{fL0}$ :負荷側摩擦(飽和)[Nm]である。バックラッシュのモデルは、厳密なモデルも提案されているが<sup>(3)</sup>、ここで取り上げるモデルはシンプルな不感帯とする。ブロック図では、入力をねじれ角度  $\theta_M - \theta_L$ , 出力を不感帯通過後の角度差となるが、運動方程式上では、図3に示す関数を  $BKLS[\theta_M - \theta_L]$  として表している。また、ブロック図のGMSモデルにおいては、速度反転時からの変位をとっている。

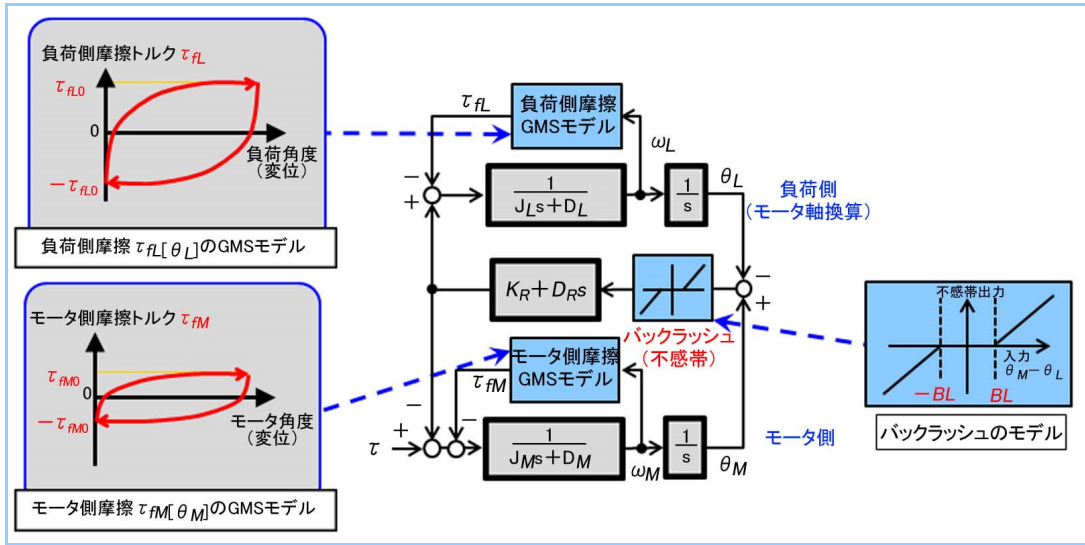


図3 2慣性系モデルのブロック図

### 3. 位相面による機械特性の可視化

位相面法は、2つの稼動データを縦軸と横軸にプロットして得られる形状に着目した手法である。手法の特徴は以下の通りである。

- 機械にわずかな変化が生じたとき、時間応答における比較では見分けることが困難なケースが多いが、位相面上では、わずかな変化でも図形的に拡大する効果があり、形の違いから機械の特性変化を捉えることができる。
- 稼動データから異なる2つのデータを組み合わせて、複数の位相面を作成することで、機械の物理的な変化を多面的に把握することができる。

図4に、ギア間調整が不適正な場合と適正に行った場合の位相面による可視化例を示す。

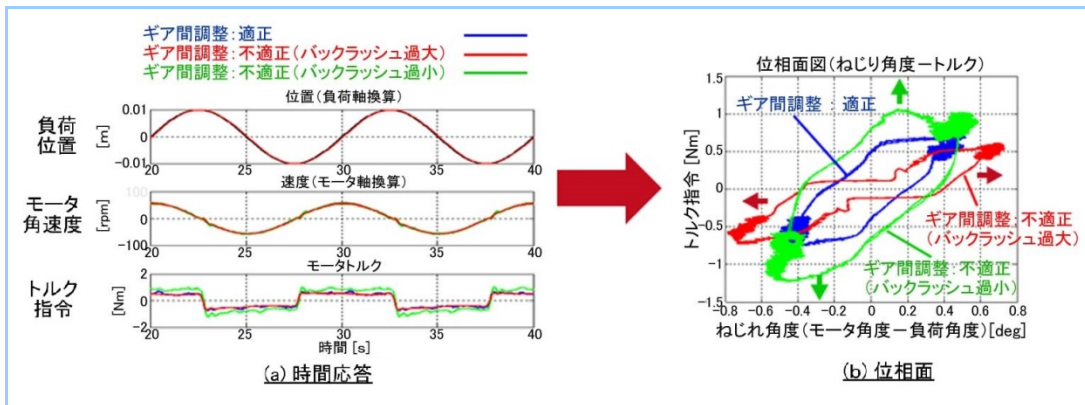


図4 位相面によるギア間調整の可視化例

図4(a)は時間応答を示しているが、調整前後の変化が捉えにくいのに対し、図4(b)の位相面表示では、わずかな変化を拡大して可視化できているのがわかる。

バックラッシュが過大な場合は位相面では横方向に広がり、バックラッシュが過小で詰め過ぎると位相面では縦方向に広がる。よって、縦にも横にも狭い状態にすれば、最適なギア間調整が可能となり、図形の形状から最適な状態が一目でわかるメリットがある。

次に、複数の位相面図を用いて、多面的に機械の特性を可視化する方法を説明する。

機械の稼動データとして、トルク指令 $\tau$ 、モータ角度 $\theta_M$ 、負荷角度 $\theta_L$ 、及び、そこから計算できるモータ角速度 $\omega_M$ 、負荷角速度 $\omega_L$ 等の状態量から2つの状態量を選び、その組合せから、複数の位相面を作成できる。更に、状態量は関数処理して新たな状態量として位相面の作成に用いることもできる。簡単な例として、モータ角度 $\theta_M$ と負荷角度 $\theta_L$ との位相差であるねじれ角度

$\theta_M - \theta_L$  や、モータ角速度と負荷角速度との位相差であるねじれ角速度  $\omega_M - \omega_L$  を使って位相面を解析することも可能である。

図5に、2慣性系モデルからの複数の位相面を示す。各位相面については、次章で詳述する。

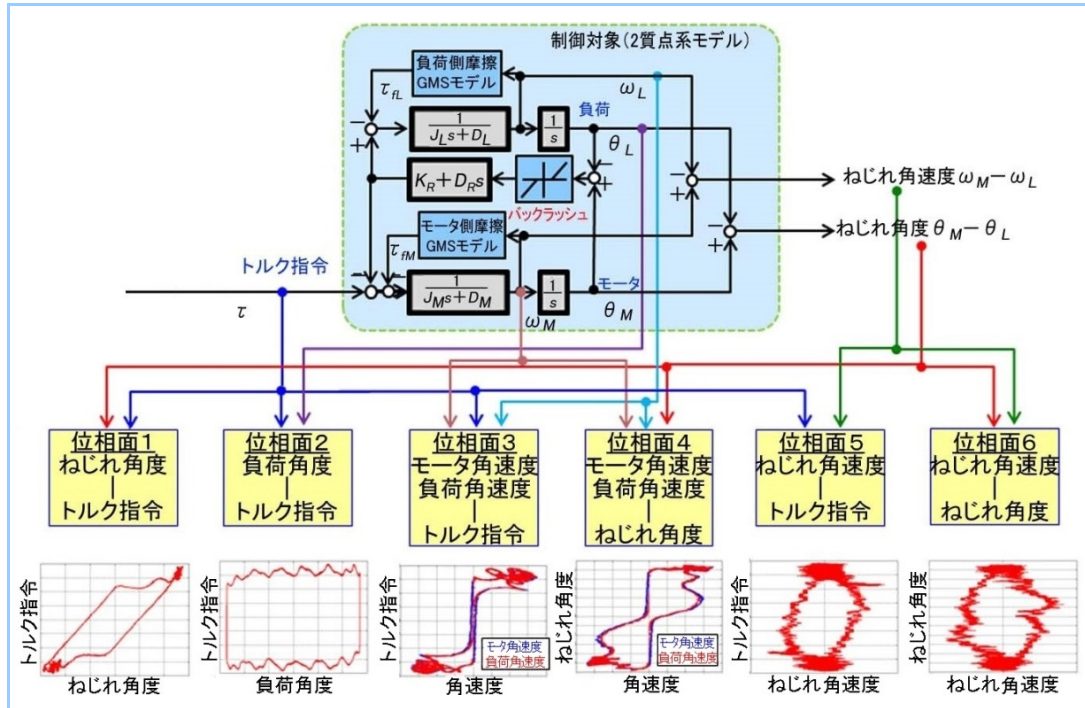


図5 2慣性系モデルからの複数の位相面

#### 4. 位相面の図形情報に基づく物理パラメータ推定

第二ステップとして、位相面の形状を製品の数式モデルと対応させて、図形の大きさ等を読み取ることで、物理パラメータを定量的に判断する。

図6に、位相面1の形状と、運動方程式(モデル)の関連付けを示す。

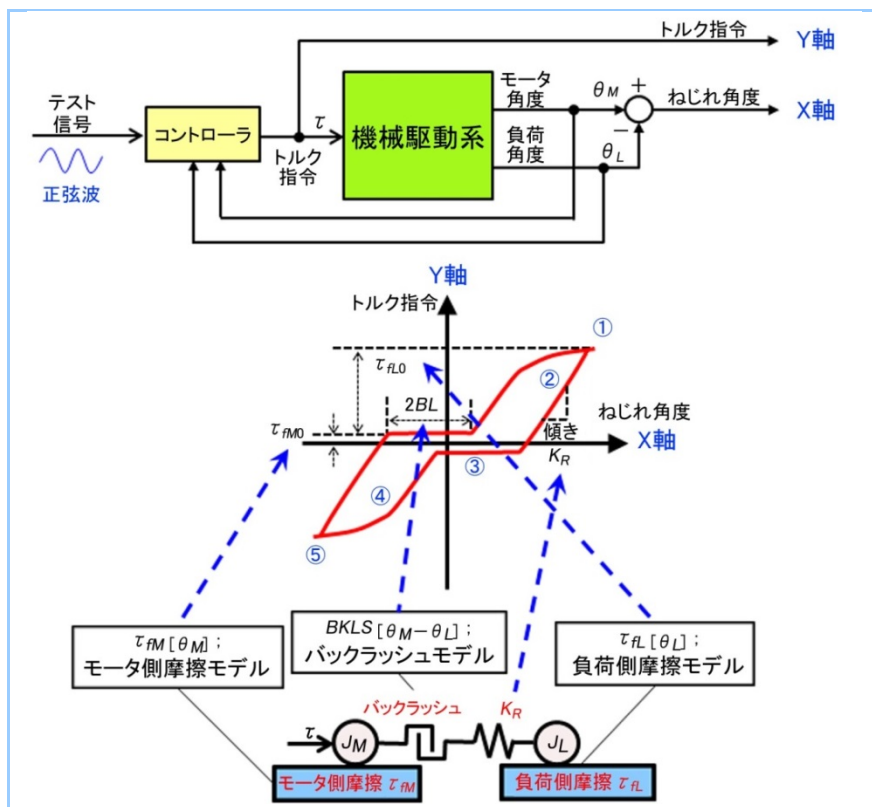


図6 位相面の形状とモデルの関連付け



例として、機械系を正弦波駆動した時の、ねじれ角とトルク指令を縦軸・横軸にした位相面を考える。この時、速度反転時の動作は動作点①から動作点⑤の間の領域の軌跡となる。表1に、各領域の動作の説明と数式モデルとの関連付けを示す。

表1 各領域の説明と数式モデルとの関連付け

	動作状態	数式モデルとの関連付け
動作点①	ギアが接触して駆動中の状態。摩擦も最大の状態。	トルク指令 $= \tau_{fM0} + \tau_{fL0}$
領域②	駆動力は減少し、軸のねじれが減少していく状態	傾きがねじれ剛性 $K_R$ に相当
領域③	バックラッシュ間を移動中	ねじれ角度:バックラッシュ幅 $2BL$ を移動中 トルク指令 $= \tau_{fM0}$
領域④	反対方向への駆動力が増し、軸のねじれが増加していく状態	傾きがねじれ剛性 $K_R$ に相当
動作点⑤	ギアが接触して駆動中の状態。摩擦も最大の状態。	トルク指令 $= -\tau_{fM0} - \tau_{fL0}$

位相面を用いて、機械特性を可視化しパラメータ推定する際には、小振幅低周波正弦波の運転パターンを用いる。小振幅低周波正弦波を用いることは以下のような長所がある。

- 加速度が小さいため、慣性トルク、粘性トルクを無視できる。また、正弦波のため、慣性トルク、粘性トルクが無視できない場合でも、位相面には直線や楕円として重畳するため区別が可能である。
- バックラッシュや摩擦の非飽和特性の比率が上がるため、非線形特性を正確に推定できる。

表2に、複数の位相面とそこから把握できる物理パラメータを示す。

表2 複数の位相面と把握できる物理パラメータ

No.	位相面	把握できる物理パラメータ面
位相面1	ねじれ角度-トルク指令	モータ側摩擦 $\tau_{fM0}$ , 負荷摩擦 $\tau_{fL0}$ , バックラッシュ $BL$ , ねじれ剛性 $K_R$
位相面2	負荷角度-トルク指令	全体摩擦 $\tau_{fM0} + \tau_{fL0}$ , 全体イナーシャ $J_M + J_L$ , 全体粘性係数 $D_M + D_L$
位相面3	角速度(モータ・負荷)-トルク指令	全体摩擦 $\tau_{fM0} + \tau_{fL0}$ , 全体イナーシャ $J_M + J_L$ , 全体粘性係数 $D_M + D_L$
位相面4	角速度(モータ・負荷)-ねじれ角度	負荷摩擦/ねじれ剛性 $\tau_{fL0}/K_R$ , バックラッシュ $BL$ , 負荷イナーシャ/ねじれ剛性 $J_L/K_R$ , 負荷粘性係数/ねじれ剛性 $D_L/K_R$
位相面5	ねじれ角速度-トルク指令	モータ側摩擦 $\tau_{fM0}$ , 負荷摩擦 $\tau_{fL0}$ ,
位相面6	ねじれ角速度-ねじれ角度	バックラッシュ $BL$ , 負荷イナーシャ/ねじれ剛性 $J_L/K_R$

複数の位相面から読み取った値が複数の物理パラメータと対応する場合は、連立させることで各物理パラメータを求めることができる。また、形状からその特徴が顕著に表れる位相面を採用したり、重み付き平均をとることでパラメータの推定精度を上げることができる。

複数の位相面のうち、特に特徴的な位相面1, 位相面2, 位相面4について、物理的な意味合いについて説明する。

他の位相面についても、同様な考え方で、物理パラメータの求めることができる。なお、角度・角速度・加速度は正弦波であれば、角度  $\theta$  を  $\theta = \theta_0 \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$  として、角速度  $\omega$  は  $\omega =$

$(2\pi f)\theta_0 \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$ , 加速度は  $s^2\theta = -(2\pi f)^2\theta_0 \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$  であるため, 角速度  $\omega$  は角度  $\theta$  の関数として  $\omega = \pm(2\pi f)\sqrt{\theta_0^2 - \theta^2}$  で, 加速度  $s^2\theta$  は,  $\omega_0 = (2\pi f)\theta_0$  とおくと, 速度  $\omega$  の関数として  $s^2\theta = \pm(2\pi f)\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}$ , もしくは, 角度  $\theta$  の関数として  $s^2\theta = -(2\pi f)^2\theta$  とおくことができる。

(1) 位相面1(ねじれ角度-トルク指令)

位相面1は, モータ側摩擦, 負荷摩擦, バックラッシュ, ねじれ剛性が最も関係しており, その物理パラメータとの関係は, 図7に示す関係より推定できる。

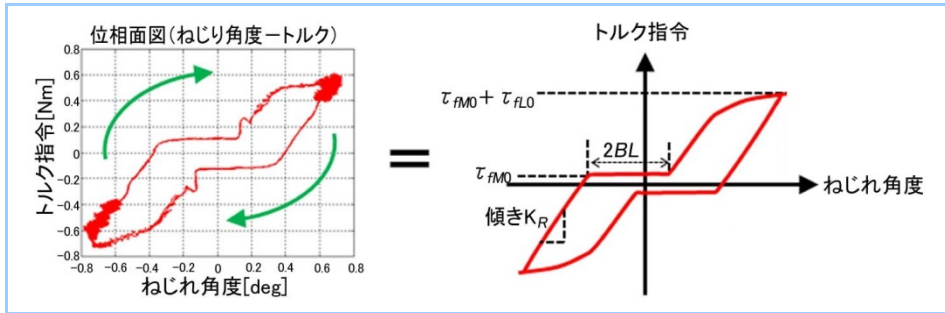


図7 位相面1(ねじれ角度-トルク指令)

(2) 位相面2(角度-トルク指令)

角度-トルク指令の位相面では, ねじれ角度やねじれ速度の要素がないため, 見かけ上, 剛体系とみなし, 式(1),(2)を,  $J = J_M + J_L$ ,  $D = D_M + D_L$  とおいて式(3)(4)が得られる。

$$\tau = \tau_{fM} + \tau_{fL} + Js^2\theta + Ds\theta \tag{3}$$

$$\tau = \tau_{fM} + \tau_{fL} - J(2\pi f)^2\theta \pm D(2\pi f)\sqrt{\theta_0^2 - \theta^2} \tag{4}$$

位相面2は, 全体のクーロン摩擦成分, 慣性力成分, 粘性力成分がそれぞれ, 楕円, 直線, 摩擦 GMS モデル特性で表され, その物理パラメータとの関係は, 図8に示す関係より推定できる。

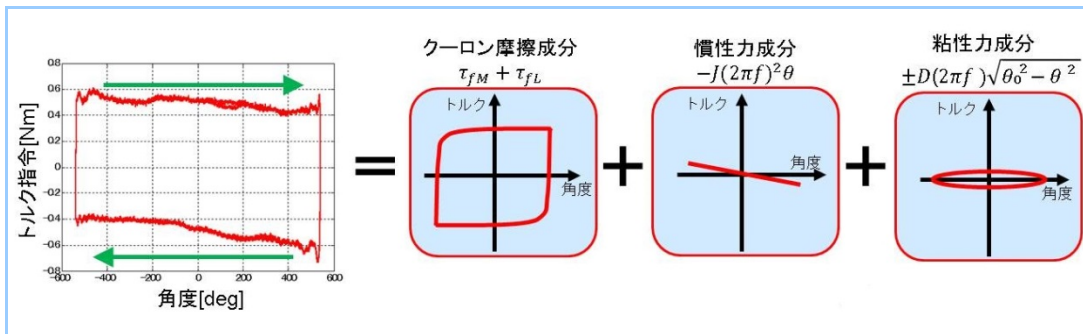


図8 位相面2(角度-トルク指令)

(3) 位相面4(角速度-ねじれ角度)

角速度-ねじれ角度の位相面では, 式(2)は式(5)(6)となる。

$$\theta_M - \theta_L = BKLS_{[\theta_M - \theta_L]} + \frac{\tau_{fL}[\theta_L] + J_L s\omega + D_L \omega}{K_R} \tag{5}$$

$$\theta_M - \theta_L = BKLS_{[\theta_M - \theta_L]} + \frac{\tau_{fL}[\theta_L] \pm J_L(2\pi f)\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2} + D_L \omega}{K_R} \tag{6}$$

位相面4は, 負荷の慣性力成分, 粘性力成分, クーロン摩擦力成分, バックラッシュがそれぞれ, 楕円, 直線, 摩擦 GMS モデル特性, ヒステリシスで表され, その物理パラメータとの関係は, 図9に示す関係より推定できる。

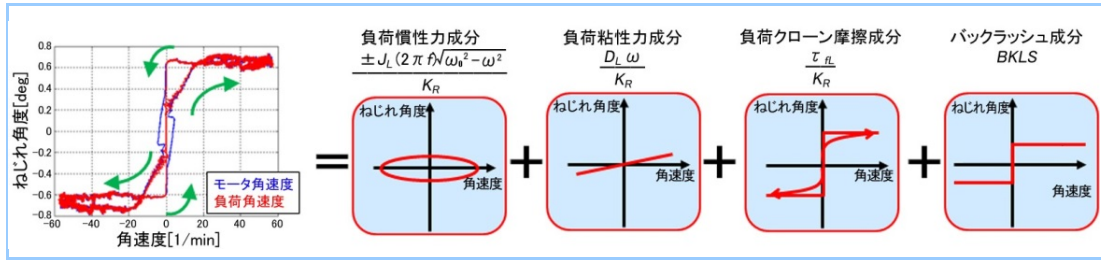


図9 位相面4(角速度－ねじれ角度)

## 5. 実験装置による可視化の有効性確認

有効性を検証するため、2慣性系の実験装置である制御系解析・検証装置を使用して実験を行った。実験では、以下の物理パラメータを変更した時の位相面1から、その違いが可視化できることを確認した。

- ギアの軸間距離を変えることでバックラッシュを変更
- テーブルウェイト枚数を変えることで負荷のクーロン摩擦を変更
- シャフト径を変えることでねじれ剛性を変更

図10に、制御系解析・検証装置の外観図を示す。

図11に、実験による可視化の有効性確認結果を示す。



図10 制御系解析・検証装置

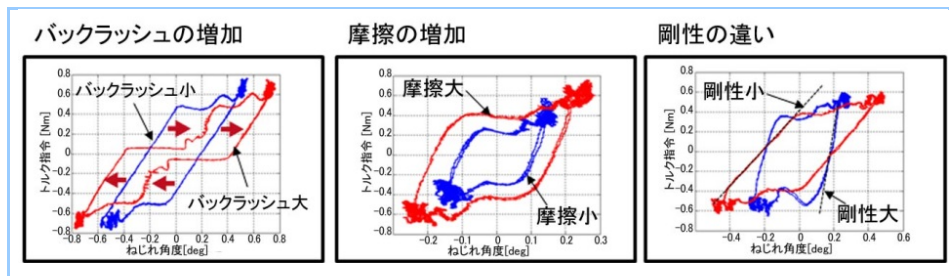


図11 実験による可視化の有効性確認結果

### (1) バックラッシュ変更

バックラッシュが増加すると、トルクは変わらず、位相面1では、トルクの正負に応じて横に位相差が広がる。これは、位相面1のバックラッシュが増加した時の形状である。

### (2) 負荷クーロン摩擦変更

負荷摩擦が増加すると、トルクもねじれ角度も増加するため、位相面2では、縦にトルクが横に位相差が広がる。これは、位相面1の負荷摩擦が増加した時の形状である。

### (3) ねじれ剛性変更

剛性が低いとトルクは変わらず、位相面1の傾きが緩くなる。これは、位相面1では、傾きがねじれ剛性に比例するためである。

以上より、位相面を利用した可視化の有効性を、実験装置を使って確認することができた。

この結果から、バックラッシュが±0.24deg 増加、摩擦が±0.15Nm 増加、ねじれ剛性が 1/4 に減少していることがわかる。

## 6. まとめ

本稿では、機械診断に有効な手法として位相面法を取り上げ、機械駆動系の一般的な対象である2慣性系モデルに対し、バックラッシュ、摩擦、剛性などの機械特性の可視化と、物理パラメータの推定手法について述べた。特に、複数の位相面を作成することで、機械特性の多面的な可視化が可能となり、さらに、数式モデルと対応させることで、図形の形状から物理パラメータの推定が可能であることを示した。最後に、実験装置を用いて、バックラッシュ、摩擦、剛性を変更した時の位相面から、機械特性の可視化と物理パラメータの把握が可能であることを示した。

本研究成果は、異常検知やヘルスマモニタリングの他に、出荷検査や機械調整など広い範囲で適用が可能であり、さらなる高精度化に向けて検討を進めていく。

## 参考文献

- (1) Zhang, Y. et al., Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, Annual Reviews in Control, No.32 (2008) p.229~252
- (2) Al-Bender, F. et al., The Generalized Maxwell-Slip Model: A Novel Model for Friction Simulation and Compensation, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.50 No.11 (2005) p.1883~1887
- (3) Nordin, M. et al., New Models for Backlash and Gear Play, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, Vol.11 (1997) p.49~63