

回転軸トルクセンサの開発と機械保全システムへの適用

Development of Torque Sensor in Rotating Shafts and Machine Maintenance System



博士(理学) 風呂川 幹央
Dr. Mikio Furokawa



大下 武諒
Takeaki Ohshita



濱田 和馬
Kazuma Hamada



平野 峻之
Takayuki Hirano

要 旨

二軸スクリュ押出機において機械や成形品の異常を事前に検知する機械保全システムを開発するため、当社独自の軸トルクセンサを開発した。これは、市販のトルクセンサではセンサ設置に対する寸法制約が厳しく、小型機から大型機までの全機種への標準搭載が困難なためである。開発トルクセンサの特徴としては、各軸にかかるトルクを個別に測れることと無線給電および無線通信方式を採用していることである。本報告書では、それら特徴の詳細、評価実験および機械保全システムへの適用例を示す。

— Synopsis —

The original torque sensor for a machine maintenance system was developed that detects abnormalities in machines and molded products before they occur is important for twin screw extruders. The reason why we developed it because there are strict spatial restrictions on the installation of sensors and it is difficult to mount sensors on all types of machines, from small to large. Its features include the ability to measure the torque applied to each axis and the use of a wireless communication system. In this review, we introduce the details of features, evaluation experiment and example of application to a machine maintenance system.

1. 緒 言

二軸スクリュ押出機を対象とした機械や成形品の異常を事前に検知する機械保全システムを開発するため、独自の軸トルクセンサを開発した。これまでの研究で、樹脂の熔融可塑性を行う第一混練部でスクリュトルクが支配的に発生していることが、オリジナルソフトウェア“TEX-FAN”⁽¹⁾を始めとした理論解析技術を通して明確になっている。実際、スクリュピースの異常摩耗などの損傷の多くはこの混練部で発生しており、さらにはそのトルクの変動が押出製品の品質に影響を及ぼす可能性が示唆されている。これは、樹脂の熔融可塑性で最も高い

エネルギーが消費されるためであり、この工程でトルクつまりせん断エネルギーをより安定させることが樹脂の化学的安定性と流体力学安定性に繋がり、結果として吐出樹脂の品質安定化にも繋がるといえる。そのため、トルクを監視することは機械的保全面だけでなく、樹脂品質の監視を行う意味でも有用である。

回転する軸のトルクを監視するトルクセンサは、主として磁性材料の磁歪現象を利用する磁歪式か、直接ひずみゲージを回転体に貼り付けるひずみゲージ式のいずれかが用いられる。現在の市販トルクセンサはセンシング精度が高いと言われる磁歪式が多いが、回転軸とセンサとのクリアランスを常時規定値に保つ必要があるため、

センサの位置固定を施すために繊細な取付け・調整作業が必要となり煩雑性が高くなる欠点がある。そのため、生産設備への常時装着を想定した場合、スクリュ交換などのメンテナンスを経た後にセンシング不良の発生が懸念され、長期運転対応に課題を有する。これに対しひずみゲージ式は回転軸にセンサを直接貼り付けることでトルク測定が可能であり、クリアランス調整など煩雑な作業が不要になる利点がある。その一方で、本方式は回転軸へ直接センサを装着するため、センシングデータの安定取得やセンサへの安定した電源供給の確保が課題となる。

今回、本研究により開発を試みた軸トルクセンサ(以降、「開発トルクセンサ」とよぶ)は、ひずみゲージ式を採用した。ひずみゲージ式は磁歪式よりも小型化、高精度化、低コスト化の点でも優れており、小型押出機への搭載にも有利となることも採用理由の一つである。これまでに我々が実施してきたマサチューセッツ工科大学(MIT)との共同研究^{(2),(3)}では、回転軸へ小型バッテリーを搭載することで電源供給の課題を解決し、ひずみセンサから無線通信によるデータ伝送方式を開発することで安定したデータ採取を可能にした。今回開発したトルクセンサは、このMITとの共同開発成果をさらに進化させ、テレメータを独自開発することで更なる小型化を実現し、押出機への加工を行うことなくセンサの設置を可能とした。加えて、バッテリーの代わりに無線給電方式を開発し、押出機の長期連続運転時での安定した電源供給と連続データ収集を実現できた。

今回の開発トルクセンサは、一般的に実施されている駆動モータの動力から軸のトルクを換算する手法や磁歪式の市販トルクセンサを用いた計測に対し、以下2つの利点がある。1つは二軸スクリュ押出機の取付けに適したデザイン設計が行える点である。押出機メーカーである当社が独自にトルクセンサを開発することで、二軸スクリュ押出機に設置するための狭小スペースや回転体への対応などの課題を解決しつつ、十分な精度でトルクを測定できるデザイン付与を可能にした。もう1つは、二軸それぞれに加わるトルクを個別にかつ常時測定が行える点である。これは、MITとの研究で培った最先端センシングデバイスの知見を活用することでよりコンパクトなトルクセンサの設計を施し、左右各軸への装着を目指したものである。これにより各々のスクリュ軸に加わるトルクを個別に監視することができ、スクリュ構成や樹脂などのプロセス条件によって発生する片軸のみの多大なトルク変化にも対応することを可能にした。

本報告では、上記ひずみゲージ式トルクセンサの開発に関し、具体的な内容について述べる。まずデバイス設計の特徴を次節で述べ、3節では左右各軸へのデ

バイス装着とトルク測定の結果について述べる。最後に、4節で本軸トルクセンサの開発と同時に開発を行った予防保全システムの一例を述べる。

2. 開発トルクセンサの特徴

2.1 省スペース性

開発トルクセンサは、二軸スクリュ押出機を改造することなく、既設機に実装することができる。二軸スクリュ押出機の各スクリュ軸のトルクを測定するためのセンサ取り付け可能箇所は、図1に示すように減速機とシリンダとの間の極僅かなスペースに限定される。この取り付け可能箇所は非常に狭く、市販トルクセンサを設置する場合は、スクリュ軸か減速機軸あるいはそれらの接続部分に加工を要するケースがある。これに対し、我々のトルクセンサは押出機本体を加工することなく取り付けられるよう設計した。これは、二軸スクリュ押出機そのものの構造を踏まえ、その構造のもとでの設計を最大限に引き出すための工夫を施すことで実現できた。そのために、筐体を樹脂とし形状の自由度を持たせた構造とし、より省スペース性に対応したデザインを施した。

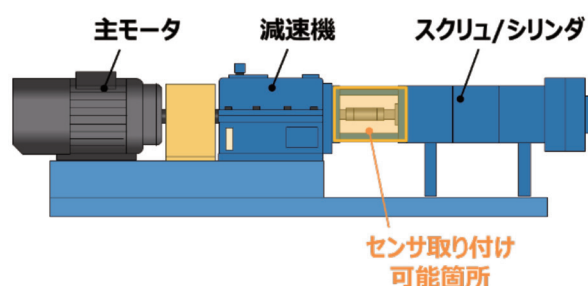


図1 二軸スクリュ押出機の主な装置構成

2.2 無線給電および無線通信

開発トルクセンサの大きな特徴は、二軸スクリュ押出機が稼働中のトルク値を常時取得することができる点にある。これにより、急激な負荷変動による突発故障や成形品の長期的な状態変化の監視へと結びつけることができる。

常時回転している二軸スクリュ押出機のスクリュ軸にセンサを装着するには、直接的な有線接続以外の方法をとる必要がある。我々は、無線給電・無線通信方式を採用することで本課題を解決し、常時計測を可能とした。図2に開発トルクセンサの構成を示す。この無線方式の採用には、MITとの共同研究にて開発した技術が適用されており、長期運転を行う二軸スクリュ押出機にも実用可能な信頼性を確保している。

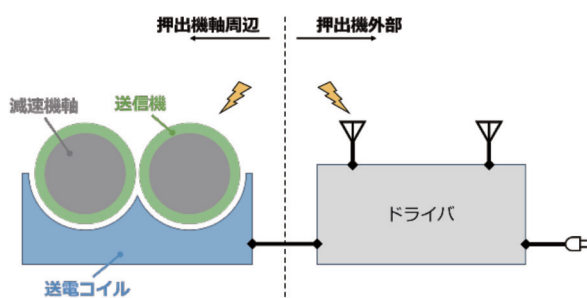


図2 開発トルクセンサの構成

3. 実験

本節では開発トルクセンサの精度確認のために行った実機検証について述べる。実験では2つの観点からその精度の妥当性を評価した。1つは従来のモータトルクとの比較によるトルク測定値のゲイン妥当性評価である。もう1つは各軸で測定されるトルク変動が、十分な精度で測定されていることの確認である。これは、スクリュ回転による周期的な変動を捉えていること、およびお互いの軸トルクがスクリュ構成から想定されるしかるべき位相ずれで観測されていることの確認である。これらを測定できれば、稼働中に発生する噛み込みや部分的な損傷などのより詳細な機械状態や樹脂の混練状態の検出が期待できる。

3.1 運転条件

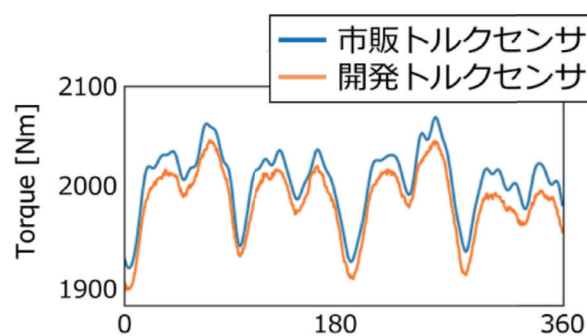
開発トルクセンサの精度確認のために行った実機検証の運転条件について述べる。検証は当社テストセンターの押出機 TEX65aII を用いた。樹脂はポリプロピレン (PP) であり、スクリュ構成は汎用的な構成で、第一混練部では一般的なニーディングディスクを用いた。押出量は 200kg/h とし、スクリュ回転数を 100, 200, 400rpm の3条件で比較検討を行った。また開発トルクセンサのゲイン妥当性評価のために、市販のトルクセンサ(以降、「市販トルクセンサ」とよぶ)を主モータと減速機との間に設置した。

3.2 開発トルクセンサのゲイン評価

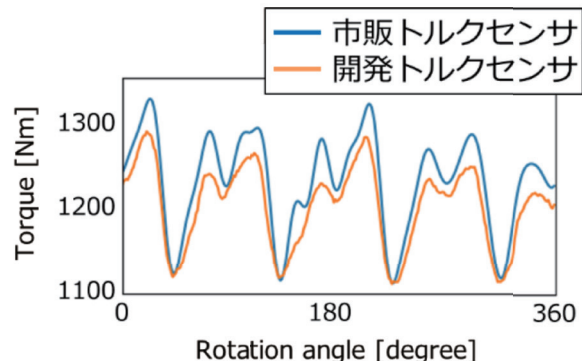
図3に開発トルクセンサと市販トルクセンサのトルク測定値を表示する。市販トルクセンサはモータ軸におけるトルクを測定するため、理論的には開発トルクセンサの測定値の合成に減速機による減衰を加味したものと一致する。結果、本実験における両者の差は最大でも5%程度であり、開発トルクセンサは妥当なゲインでの測定が可能であることが確認できた。一方で、いずれの条件においても市販トルクセンサの値の方が大きくなって

るが、これは減速機を経由することによる減衰影響であると考えられる。一般に減速機によるトルク伝達の減衰は大きくても5~10%程度と言われており、本実験における両センサの差と同程度である。また回転数が高いほどその差は大きくなっているが、減速機の減衰は回転数に比例するためと考えられる。

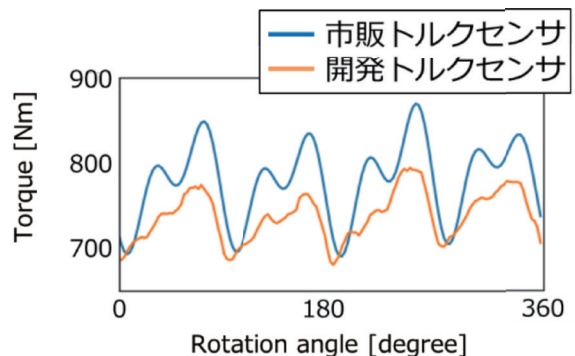
以上のことから、開発トルクセンサは実績のある市販トルクセンサの測定値と比較し、十分な精度で測定可能であることが確認できた。



(a) 回転数100rpm



(b) 回転数200rpm



(c) 回転数400rpm

図3 2種のトルクセンサによるゲイン評価

3.3 各軸のトルク測定の妥当性評価

図4にスクリュが一回転する際の樹脂圧力変動の解析結果を示す。図中(a)は圧力値を採取したシリンダ頂部を示しており、図中(b)はその圧力結果である。樹脂圧力は、スクリュ頂部がシリンダの頂部にさしかかる際にピーク値を示すことが知られている^{(4),(5)}。これは、シリンダ頂部で樹脂が強い圧縮作用を受けつつ練られることによる負荷変動であり、この現象を捉えることができれば、混練状態を踏まえた樹脂品質の評価が可能になると期待できる。

そこで、開発トルクセンサによりスクリュ回転に伴う負荷変動を捉えることが可能か否かの検討を行った。図5にスクリュ回転数100rpmでの開発トルクセンサの各軸測定値を示す。減速機側から見て左側をL軸、右側をR軸とする。図6には、図5中の各スクリュ回転角度による圧力分布を示している。図5の各軸のトルクピー

クと図6の圧力分布図とを対比すると、スクリュ回転による樹脂の圧縮と混練が最も促進される回転角度でトルクのピークが発生している。圧力分布は溶融樹脂を対象とした流動解析結果であるが、実際のトルク計測時は固体樹脂ペレットが圧縮・緻密化され溶融可塑性のために最大エネルギーが付与される状態であるため、明確に高いトルクが生じていると考えられる。

図5のL軸とR軸で測定されるトルクを比較すると、一定の位相ずれでトルク変動が発生している。図6のスクリュ断面図にあるように、L軸とR軸は回転方向に一定の位相で組まれている。そのため、樹脂圧力やトルクがピークを迎えるタイミングもその位相分の差で発生する。今回テストで用いた二条ニーディングディスクであれば、L軸とR軸の位相は90度であり、L軸とR軸のトルク変動にも位相ずれが発生していることが明確になった。

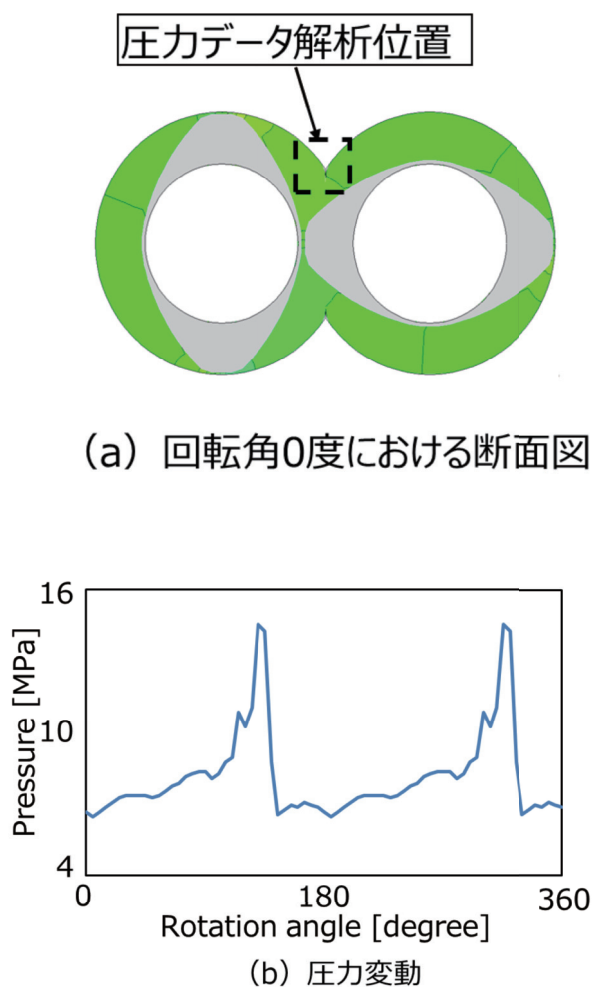


図4 シリンダ頂部における圧力変動

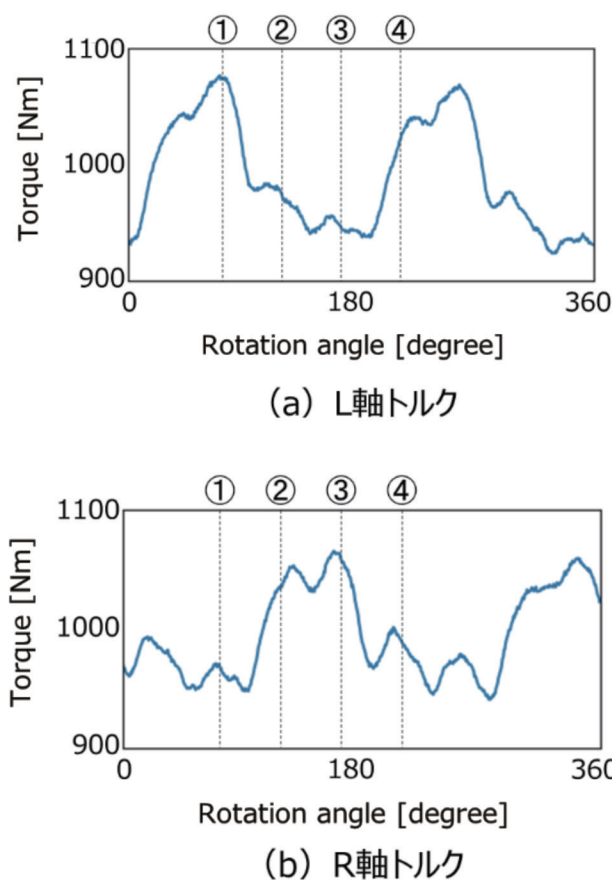
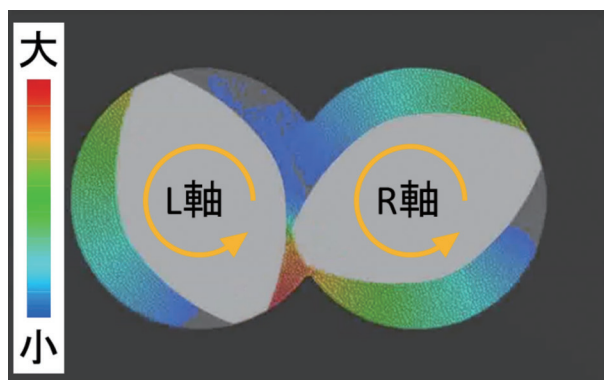
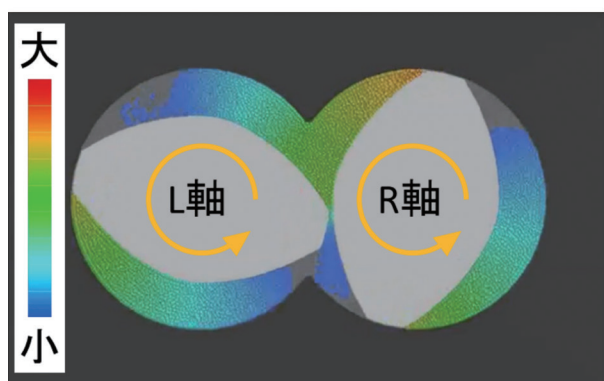


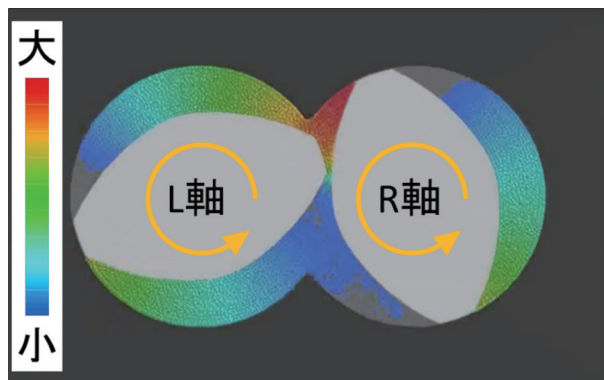
図5 各軸のトルク変動の比較



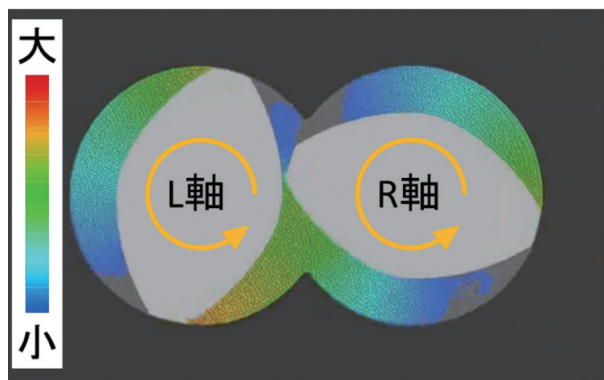
(a) 図5①における圧力分布



(b) 図5②における圧力分布



(c) 図5③における圧力分布



(d) 図5④における圧力分布

図6 図5中の各回転角度での断面樹脂圧力分布(解析結果)

4. 機械保全システム

前節で述べた開発トルクセンサの特徴、スクリュ回転に伴うトルク変動を正確に捉えることを利用した異常検知例を示す。ここでは、第一混練部のスクリュ摩耗を異常検知の対象とした。具体的には、3.1節で述べた条件でのスクリュ構成について、第一混練部の二条ニーディングスクリュを標準外形および摩耗を模擬して外形カットを施した外径の2条件にてデータを収集した。なお、スクリュ構成以外の条件は全て同一とした。図7に標準外形時のデータと摩耗外径時のデータを表示する。

摩耗外径ではフライトクリアランスが広がるため、スクリュ頂部がシリンダの頂部にさしかかった際の樹脂圧縮力が低下し、結果としてトルクが低下する。そのため、スクリュ回転によるトルク波形は標準外径に比べ振幅が小さくなり、混練性能もマイルドになることが分かる。つまり、標準外径時のトルク波形を綿密に計測しておけば、やがてスクリュが経年劣化し摩耗が見られた際もスクリュを直接計測せずとも稼働データから予知することが可能である。

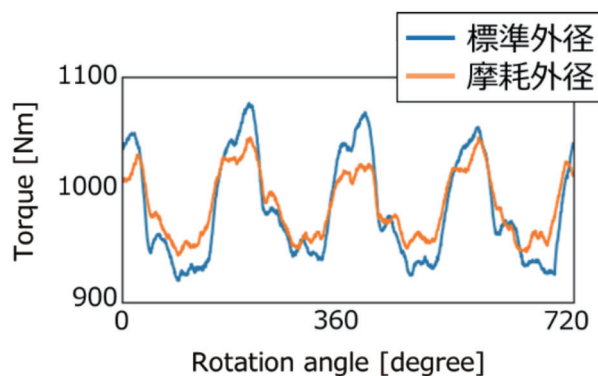


図7 標準外形と摩耗外形のトルク比較

5. 結 言

我々は二軸スクリュ押出機において機械や成形品の異常を事前に検知する機械保全システムを提案するため、当社独自の軸トルクセンサを開発し、十分な精度でトルクが測定可能であることを確認した。加えて、本トルクセンサはスクリュ回転に伴うトルク変動を捉えることができ、その特徴を利用することで、スクリュ摩耗の検知という一つの機械保全システムが実現可能であることを示した。

今後この開発センサにより得られるデータを蓄積していくことで、各種状態推定や予防保全システムへと活用し、お客様が長期間安心して当社の二軸スクリュ押出機を使用できる環境をさらに深めていく所存である。

参考文献

- (1) 石橋正通, 富山秀樹, 井上茂樹: “二軸スクリュ押出機内の樹脂挙動解析ソフトウェア「TEX-FAN」の開発”, 日本製鋼所技報, No. 55 (2004), pp. 32-38
- (2) 風呂川幹央, E. Gest, 平野峻之, K. Youcef-Toumi: “回転軸のヘルスマonitoringに適応可能な多目的・低コストセンサの開発”, 日本製鋼所技報, No. 70 (2019), pp. 12-17
- (3) E. Gest, M. Furokawa, T. Hirano, and K. Youcef-Toumi: “Design of Versatile and Low-Cost Shaft Sensor for Health Monitoring”, 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), (2019), pp. 1926-1932
- (4) 富山秀樹: 二軸押出機による押出混練技術, “二軸押出機の特徴・要素と点検・保全のポイント”, 情報機構 (2016), pp.28-48.
- (5) T. Bertrand, F. Thibault, L. Delamare, and P.A.F.: “Adaptive finite element simulations of fluid flow in twin-screw extruders”, Computers & Chemical Engineering, Vol. 27 (2003), No. 4, pp. 491-500