

工作機械向け油圧システムの省エネルギー化の取り組み

Energy Saving Efforts in Hydraulic Systems for Machine Tools

寺田達博 T. TERADA 高木賢一 K. TAKAGI 成田昌史 M. NARITA

In modern society, there is a need to take steps to reduce environmental impacts as measures against climate change to achieve carbon neutrality, in which greenhouse gas emissions are effectively reduced to zero. Methods to reduce energy use by hydraulic systems in production facilities were studied and examples of how they can contribute to energy saving are listed in this article.

Key Words: energy-saving, machining tools, hydraulic system, pump, hydraulic unit, solenoid valve

1. はじめに

現代社会においてエネルギーや気候変動に対する環境対応として、温室効果ガス排出量を実質ゼロにするカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みが求められている。その結果、従来のコスト削減を目的としていた省エネルギー化が、近年は企業の社会的責任へと認識が変化している。

日本全体の電力消費のうち、約4割を製造業が占め、さらに工場で消費する電力の約8割が生産設備であることから、生産設備の省エネルギー化は重要である。

当社は用途に合わせた省エネルギーの考え方(図1)に基づき、生産設備に搭載される油圧システムのさまざまなニーズに応じたシリーズ拡充に取り組んできた。

本報では、主に工作機械向け油圧システム(油圧ユニット、油圧制御弁)の省エネルギー化の取り組みについて紹介する。

2. 油圧システムの省エネルギー化

一般的に、油圧システムの省エネルギー対策として、工作物のクランプやツールの把持などのアクチュエータ作動時を除き、流量を必要としない待機状態のエネルギー損失低減が大きな消費電力改善になると知られている(図2)。そこで、当社はモーターの回転速度制御やモーターの間欠運転を組み合わせた取り組みと、油圧制御弁の省エネルギー化に取り組んだ。その取り組み結果と油圧システムの省エネルギー性の比較を図3に示す。①高効率可変容量形ベーンポンプと②インバーターによるモーター制御、③モーター停止による間欠運転、④油圧制御弁(電磁弁)の省エネルギー化について述べる。

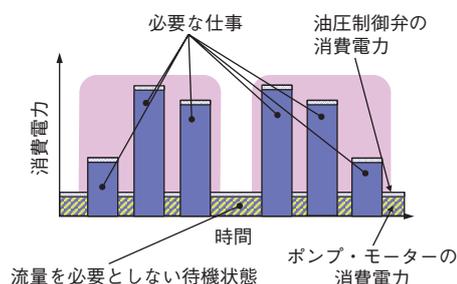


図2 省エネルギー対策
Energy saving measures

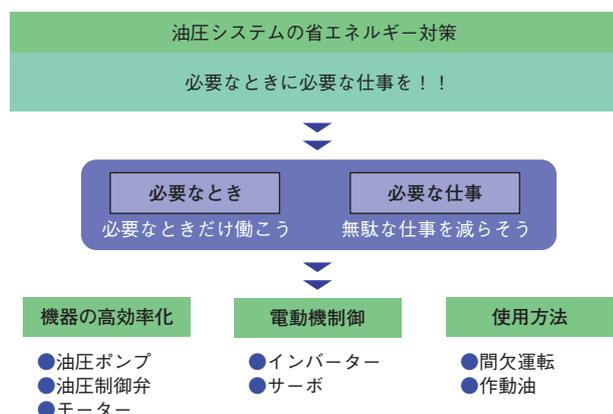


図1 当社における省エネルギーの考え方
Energy saving concept

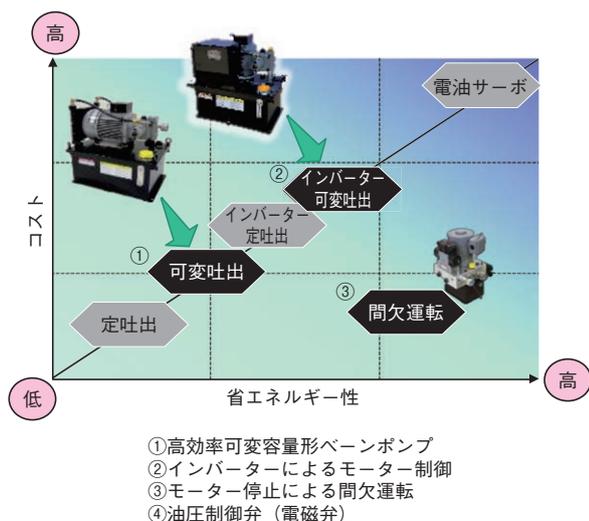


図3 油圧システムの省エネルギー性比較
Comparison of energy saving by hydraulic unit

3. 省エネルギー油圧システム開発の取り組み

3.1 高効率可変容量形ベーンポンプの改良

省エネルギー油圧システム（図4）の構成要素である油圧ポンプは、内部油の漏れ量の低減と構成部品の小型化を図り、モーターはプレミアム効率クラス（IE3：国際エネルギー効率規制による高レベルの効率グレード）を搭載することで、消費電力低減を実現している。この高効率可変容量形ベーンポンプ開発の取り組みについて下記に示す。



図4 高効率可変容量形ポンプ搭載油圧システム
Hydraulic unit with high efficiency variable-displacement vane pump

3.1.1 可変容量形ベーンポンプの構造

可変容量形ベーンポンプを図5に示す。このポンプはローター、リング、ベーンで構成された空間の体積変化を利用する容積形ポンプで、吐出量はローターに対するリングの偏心率を変えることで調整できる。たとえば、OUT側に油圧力が発生し、リングに作用する油圧力の分力がスプリングの押し付け力以上に達すると、ローター中心方向にリングが移動し、偏心率が減ることで吐出量を減少させる。

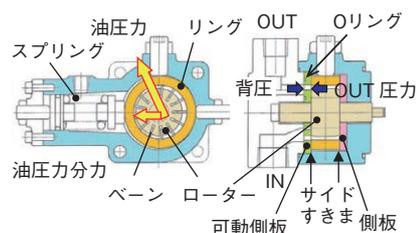


図5 可変容量形ベーンポンプの構造
Structure of variable-displacement vane pump

ローターと側板の間はサイドすきまを設けており、OUT圧力が上昇すると、側板の変形によりサイドすきまが増加し漏れが大きくなる。そのためOUT圧力を側板背面のOリングで囲まれた背圧受圧領域へ導き、ローター側のOUT圧力に対抗することで適正なすきまを得る可動側板構造とした。

3.1.2 高効率可変容量形ベーンポンプの特長と省エネルギー性

ベーンポンプの省エネルギー化として、背圧の最適化により可動側板の変形を抑制することで漏れを低減した。また、構成部品を20%小型化することで摩擦損失を低減した。この高効率化により16%の消費電力低減を実現した。図6にベーンポンプの断面を示す。

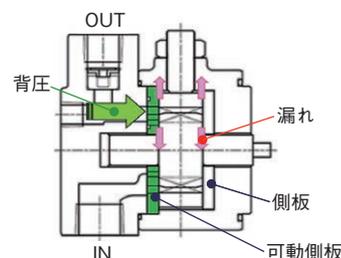


図6 ポンプ断面
Cross section of pump

1) 可動側板の変形量低減

従来品の可動側板は、ローター側のOUT圧力領域に対向する背圧受圧領域が広く、ローター側への変形が部分的に大きいため、サイドすきまを大きくしてローターとの干渉を避ける必要があった。そこで、変形量を低減するため、可動側板の背圧受圧領域の変形をFEM解析により最適化し、従来品に対し最大変形量を40%低減した（図7、図8）。

これにより、可動側板の部分的な変形を抑制し、均一化することで、サイドすきまを小さく設定でき、漏れの低減が可能となった。

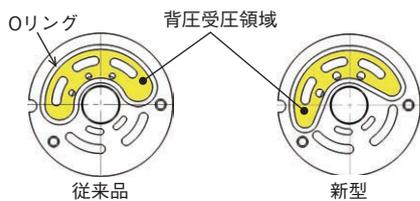


図7 可動側板の比較
Comparison of movable side plate

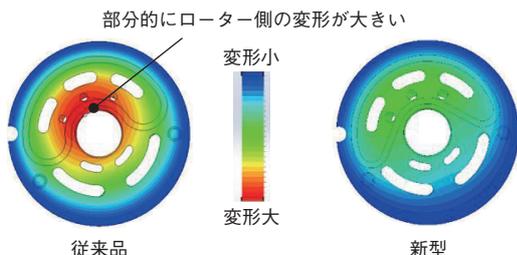


図8 FEM 解析結果（軸方向変形量）
Result of FEM analysis (Axial deformation)

2) 低サージ圧化

ポート角度をスプリング側に変更し（図9）、リングに作用する油圧力をスプリング方向に近づけることで、リングの移動速度を約2倍に向上させ、アクチュエータ停止時に発生するサージ圧力（ポンプOUT側遮断時のオイルハンマー）を低減した（図10, 図11, 図12）。これにより、油圧配管・機器の信頼性向上、クランプ回路使用時の加工精度向上に貢献できる。

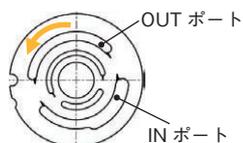


図9 ポート角度の変更
Change of port angle

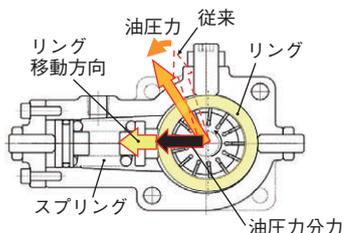


図10 リングの油圧力方向
Hydraulic direction of ring

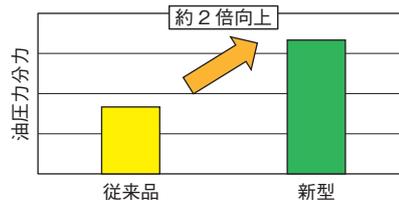


図11 スプリング方向の油圧力
Hydraulic pressure in spring direction

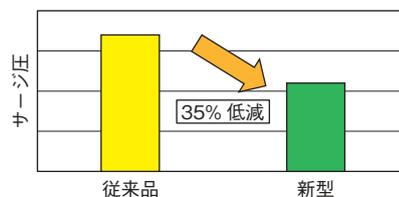


図12 サージ圧
Surge pressure

3) 小型・軽量化

低サージ圧化により、リング・ローターなど構成部品の小型化（小径化）が可能となり、摩擦トルクの低減と軽量化を実現した（図13, 図14）。

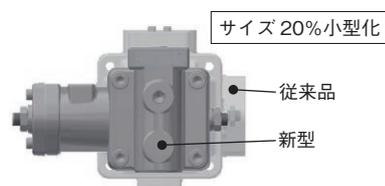


図13 部品の小型化
Downsizing of pump components

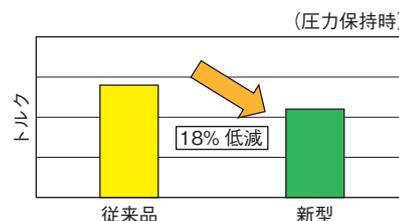


図14 摩擦トルク低減効果
Frictional torque reduction effect

3.2 インバーターによるモーター回転速度制御

インバーターでモーターの回転速度を制御して、圧力保持待機中は低速回転にすることで、当社の連続運転の標準システムに対し、50%の待機時消費電力低減を実現した（図15）。

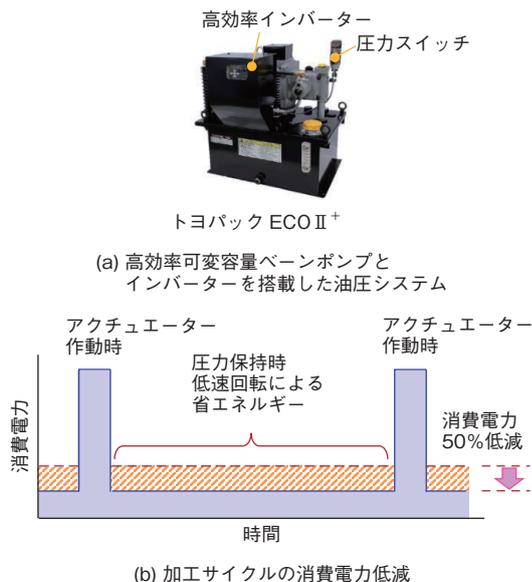


図15 モーター回転速度制御
Speed control of motor

なお、インバーターの調整は出荷時に設定完了しており、圧力スイッチから圧力保持状態を自動検知し、モーターの回転速度をインバーター制御できる。このため、モーター回転速度が一定の油圧システムと同様に、油圧ポンプと圧力スイッチの圧力設定のみで運転でき、取り扱いが簡単である。

インバーター制御方式は高効率可変容量形ポンプの流量特性に特化しており、圧力が変動しても安定した運転ができる。さらに、ポンプとモーターの回転速度を下げることによって、省エネルギーと並ぶ環境課題である騒音環境も改善している。

また、予防保全ニーズにこたえるため、インバーターのモニター機能を活用してIoT対応とした。たとえば、モーターの電流やトルクを監視し、負荷状況の異常検知による油圧システム故障診断などの機能で、生産性向上に貢献できる。

図16にマシニングセンターへの導入例を示す。年間稼働時間4000時間、電動機容量2.2kW、CO₂排出係数0.55k-CO₂/kWhの場合、年間660kWh/台の消費電力、CO₂排出量を365kg/台の削減が可能である。仮に工場に200台ある場合は、CO₂を73トン、電力を132000kWh削減できる。

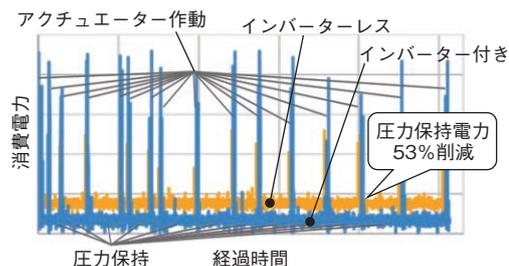


図16 省エネルギー効果
Energy saving effect

エネルギー使用量を抑えるため、各国でモーターの効率規制強化が進んでいる。各国の効率規制強化に対応するため、誘導モーターより高効率で規制対象外のIPM (Interior Permanent Magnet) モーターを搭載し、さらなる省エネルギー化とともに、仕向地ごとにつくり分ける必要がないモデルを準備している (図17)。



図17 IPM モーター搭載油圧システム
Hydraulic unit with IPM motor

3.3 モーター停止による間欠運転

油圧の圧力保持待機時間にモーターの運転を停止する間欠運転は、サイクル運転中の回路圧力および流量の確保、保圧時のリーク補償をすることで、圧力保持時消費電力をゼロとした (図18)。

このシステムは小型マシニングセンター用の治具クランプに最適である。

図19にマシニングセンターへ間欠モーター搭載の油圧システムを導入した例を示す。

年間稼働時間4000時間、電動機容量0.75kW、CO₂排出係数0.55kg-CO₂/kWhの場合、年間1300kWh/台の消費電力、CO₂-720kg/台の削減が可能である。

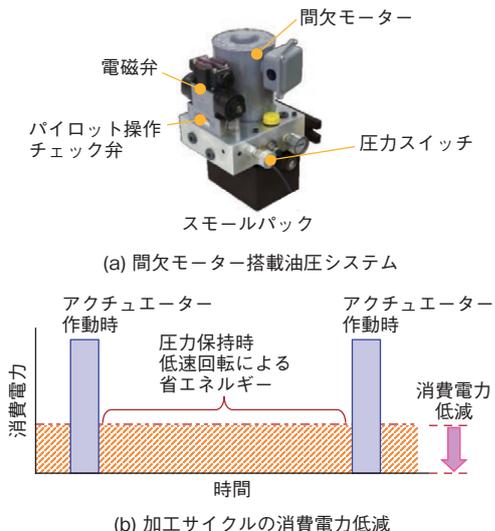


図18 間欠運転 Intermittent operation



図19 省エネルギー効果 Energy saving effect

3.4 電磁弁の低電力化への取り組み

電磁弁の構造を図20に示す。ソレノイドの励磁によってスプールを切り換え、油の流れる方向を制御する電磁弁では、ソレノイドの磁気効率向上と吸引力特性の最適化により、消費電力を30%低減した。この低電力電磁弁の取り組みを紹介する。

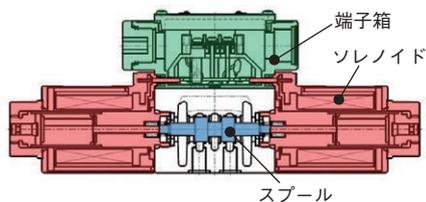


図20 電磁弁の構造 Structure of solenoid valve

3.4.1 従来品の構造

従来品のソレノイドの構造を図21に、磁場解析結果を図22に示す。磁気回路中の部品点数が多く(6部品)、部品間のすきまで磁気飽和となり、磁気効率が低下する要因となる。そのため、低電力化にはソレノイド磁気回路の構造を見直し、磁気効率を向上させることが必要不可欠である。

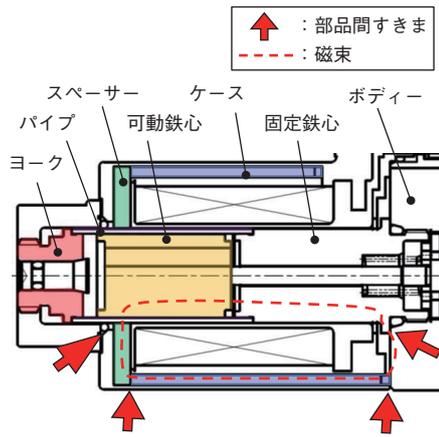


図21 従来品の構造 Structure of conventional product

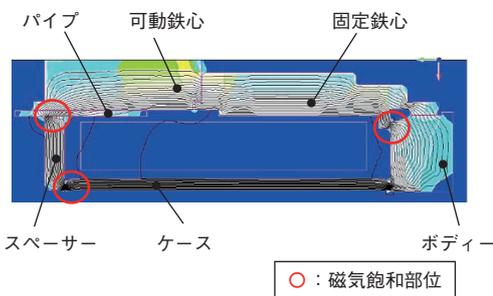


図22 磁場解析結果(従来品) Result of magnetic field analysis (Conventional product)

3.4.2 新型ソレノイドの構造

1) ソレノイド磁気回路の効率向上

新型ソレノイドの磁場解析結果を図23に示す。従来品の課題を解決するため、下記の構造を見直した。

- ① ケースとスペーサーを一体化し、部品間のすきまがない構造とした。
- ② ケースとヨーク端面を密着構造とすることで、磁気飽和しない接触面積とした。
- ③ 従来品の固定鉄心、ボディー間では磁気回路を形成する接触面積が小さくなっていることから、ボディー側スペーサーの追加により磁気飽和しない接触面積とした。

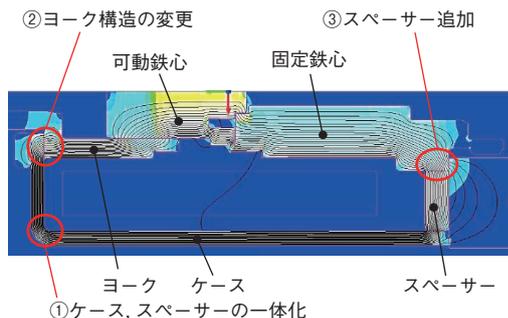


図23 磁場解析結果（新型）
Result of magnetic field analysis (New model)

2) 吸引力曲線の最適化

吸引力に反してスプールに加わる負荷荷重は、スプールしゅう動抵抗とスプリング反力および流体力であり、負荷荷重より大きいソレノイド吸引力でスプールを押しこむことで、スプールは切り換わる（図24）。

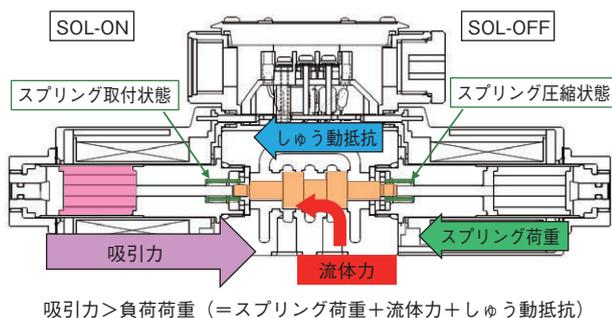


図24 吸引力と負荷荷重
Suction power and applied load

従来品のソレノイドで電流を30%低減すると、流体力が最大となる負荷最大位置で吸引力は負荷荷重以下となるため、スプールを最後まで押しこまずに切り換えができない。

図25に可動鉄心ストローク量と吸引力の関係を示す。従来品は、ストローク全域で負荷荷重に対して吸引力に余裕はあるが、吸着位置近傍の吸引力が特に高い特性となっており、負荷荷重に対して過剰となっている（図25 ハッチング部）。

吸引力曲線はプランジャーの吸着面形状によって特性が変わるため、プランジャーの吸着面形状を見直すことで、吸着位置近傍の過剰な吸引力を低減し、負荷最大位置と余裕代の少ない位置で吸引力が増大する特性とした。

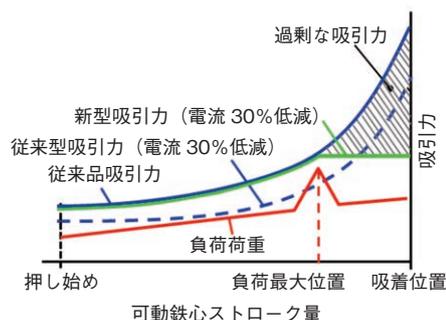


図25 従来品と新型の吸引力
Suction power of conventional product and new models

負荷荷重に対し、最適化された吸引力特性と磁気効率向上との組み合わせで必要な吸引力が確保でき、消費電力30%低減を実現した。

4. おわりに

当社における油圧システム省エネルギーの考え方を基に工作機械向け油圧システムの省エネルギー化について述べてきた。今後も、「必要なときに必要な油量を供給する」を基本的な考え方として、さまざまなニーズに対応した省エネルギー油圧システムの開発を進めていく。

参考文献

- 1) 三浦恵史, 岸 将男: 省エネ油圧システムの開発, 機械設計, 第67巻第6号 (2023年5月号) 12-15.

筆者



寺田達博*
T. TERADA



高木賢一*
K. TAKAGI



成田昌史*
M. NARITA

* 株式会社ジェイテクトフルードパワーシステム
開発技術部