

論文内容の要旨

作動油を媒体としてエンジンあるいは電動機からの入力動力を伝達し、機械エネルギーに変換して外部仕事をする油圧システムは、電動システムに比べて単位質量あたりの出力が大きいという利点を有している。しかし、油圧システムは、エンジンあるいは電動機からの入力動力を油圧エネルギーに変換しているため、エネルギーの変換ロスが発生するのに加えて、各油圧機器で大きな損失が発生するため、電動システムに比べて損失が大きいという欠点を有している。

近年、脱炭素社会の実現が益々叫ばれており、油圧ショベルにとっても省エネルギー化は重要であると考えられる。油圧ショベルではこれまで、操作性の向上と省エネルギー性の向上を両立するために、様々な改善が図られているが、依然として多くの損失が発生している。そこで、国内では 2000 年前後から、ハイブリッド式油圧ショベルの開発が進められている。省エネルギー性能に優れたハイブリッド式油圧ショベルであるが、従来の油圧ショベルに対して販売価格が高額になるという欠点があるため、比較的安価で、且つ省エネルギー性能が高い油圧ショベルの開発が求められている。一方、欧州を中心に 2000 年前後から、制御性能の高いサーボバルブの代わりに、低コストの切換バルブを用いて高精度な制御を実現する油圧システムのデジタル化に関する研究が進められている。油圧システムのデジタル化により、ハイブリッド式油圧ショベルに比べて比較的安価で、且つ省エネルギー性能が高いシステムの実現が期待できる。油圧システムのデジタル化の分野で、電気回路のスイッチングシステムの原理を模倣して油圧システムに応用した、スイッチング技術のコンセプトが提案されている。

そこで、本研究では、油圧ショベル等の建設機械において、シリンダに直結した機構部を運動している状態から減速させる場合に、機構部の質量に蓄えられた運動エネルギーを熱エネルギーとして消散させるのではなく、電気系の昇圧チョップの原理を応用した、油圧回路内でのエネルギー回生について検討した。

まず、シリンダが付加された複雑なシステムにおいても、現象のメカニズムの把握やパラメータの影響に対して直感的な見通しを得ることを目的として、モード解析を用いた流量応答解析法を検討した。シリンダが付加されたシステムでの現象を考える前に、エネルギー回生メカニズムの基本である電気系と等価なモデルとして、管路と切換バルブのみで構成され、油を剛体と仮定した線形 1 自由度モデルを取り上げ、基本的な現象が、外力条件である入口側の圧力、高圧源の圧力、バルブの切換周波数、バルブのデューティ比以外に、等価質量、等価減衰によって支配されていることを示した。管路と切換バルブで構成された部分にシリンダおよび機構部の質量が付加されたモデルにおいて、流量応答を平均流量と振動流量に分離し、振動流量の計算には近似的な理論式を用いるモード解析を用いて、シリンダ付加による影響を大きく受ける低次モードと、管路系の油の弾性変形の影響を大きく受ける高次モードに分離する流量応答解析法を提案した。提案法による計算結果と有限要素法による詳細モデルを用いた固有値解析結果、時刻歴応答解析結果とを比較し、理論式導出のために適用した近似の妥当性、特に低次モードで管路内の油を剛体と仮定したこと、高次

モードでシリンダおよび機構部からの影響を無視したことの妥当性を示した。

次に、シリンダや機構部の質量が付加された系（弾性シリンダ付加モデル）と電気系と等価な系（1自由度管路モデル）において、振動流量を計算する際に使用する周波数応答関数の違いについて検討した。その結果、弾性シリンダ付加モデルの周波数応答関数のゲインは、3次以降の高次の固有振動数との共振ピークが繰り返し現れており、1自由度管路モデルの場合のように周波数が増加するとともにゲインが減少していくわけではないこと、バルブの切換周波数が2次の固有振動数よりも十分大きい場合は、両者の周波数応答関数が一致し、バルブの切換周波数が比較的低い領域における両者の違いは、系の等価質量と等価減衰の比に起因していることを示した。バルブの切換周波数、等価質量、等価減衰、バルブのデューティー比の各パラメータが、低次モードと高次モードにどのように影響するかを検討した。バルブの切換周波数の影響については、低次モードは切換周波数が増加するにつれて振動流量の低次成分の平均値は減少すること、高次モードはバルブの切換周波数の基本成分および高調波成分が系の固有振動数と共振すれば、振動流量の高次成分の平均値は負の方向に大きな値を示し、振動回生効率の大幅な低下につながることを示した。質量の影響については、管路系の等価質量を増加させると、低次モードにおいて振動流量が減少する方向に働くとともに、高次モードにおいても、周波数応答関数の値が減少し振動流量の減少につながることから、いずれの周波数領域においても振動流量の平均値は負の方向で減少しており、振動回生効率は増加することを示した。減衰の影響については、管路系の等価減衰、機構部の等価減衰を増加させると平均流量は減少するが、減衰比の増加は平均流量には影響しない。管路系の等価減衰、減衰比の増加は基本的には振動流量の平均値の負の方向における増加につながり、共振周波数近傍では異なる傾向を示すが、機構部の等価減衰の増加は振動流量の低次成分の平均値の負の方向における増加につながり、振動流量の高次成分の平均値には影響しないことを示した。バルブのデューティー比の影響については、デューティー比が0.25の場合は0.5の場合には存在しなかった2次の高調波が存在するので、その高調波と系の固有振動数が共振すれば、振動流量の高次成分の平均値の負の方向における増加につながることを示した。

次に、反共振を利用して流量応答を低減し回生効率の向上が可能であるかを検討した。一般的によく使用されている断面変化のない管路系の場合について、油圧管路系を有限要素法でモデル化して流量応答およびエネルギー回生効率を計算した。その結果、加振力の2次の高調波成分が存在しないデューティー比が0.5の場合では、切換周波数を反共振周波数に設定すれば、応答を低減させる効果があるが、2次の高調波成分が存在するデューティー比が0.25の場合では、基本周波数を反共振周波数に設定すれば、2次の高調波が共振にかかってしまうことにより逆に応答が悪化することを示した。実際の制御では、デューティー比を変化させる必要があるため、このままでは反共振を利用することが難しい。そこで、断面変化のない管路形状にこだわらず形状を工夫することにより、バルブの切換周波数の基本周波数から3次までの高調波成分をすべて管路系の反共振周波数に設定することができれば、流量応答を低減することが可能ではないかと考え、その形状ならびにその場合の流量応答およびエネルギー回生効率を計算した。まず、パラメータの設定がわかりやすい管路形状として、管路の断面積が3段階で変化する3段モデルで検討を行った。その結果、2つの断面積比という設計変数をうまく設定すれば、3次までの高調波成分をすべて管路系の反共振周波数に設定

することが可能であることを示した。次に、3段モデルでの断面積の急激な変化は管路圧損の増大につながり、回生効率低下の要因になることから、管路の断面積が連続的に変化する形状について同様の検討を行った。その結果、3段モデルの場合と同様に、3次までの高調波成分をすべて管路系の反共振周波数に設定することができ、断面変化のない管路系の場合と比べてエネルギー回生効率が向上することを示した。

次に、バルブの切換時間やバルブ近傍の管路の構成の影響を把握するためのモデル化手法として有限要素法の考え方をを用いて要素分割するとともに、バルブ開閉を開口断面積により変化する非線形減衰とするなどのモデル化を行い、時刻歴応答計算によりエネルギー回生効率や平均流量を算出する手法を提案した。試作した実験装置を用いて、高圧源へエネルギー回生ができていることを確認するとともに、実験値と計算値の比較検討により、提案した計算法が妥当であることを示した。次に、提案した手法を用いて、数値シミュレーションを実施し、バルブの切換時間やバルブ近傍の管路構成の違いによってエネルギー回生効率や平均流量にどのように影響するかを検討した。その結果、バルブの切換時間が長くなればエネルギー回生効率は低下し、バルブ近傍に管路が挿入されれば、条件によるばらつきはあるものの平均的にはエネルギー回生効率、平均流量は低下するという結果が得られた。管路の挿入については、系での質量、減衰の増加に関連した効果だけでなく、系の固有振動数が低下するため、条件によっては油の弾性振動の影響を受ける周波数が低下し、エネルギー回生効率、平均流量の大幅な低下につながる場合やバルブの切換時間のエネルギー回生効率への影響度が大きくなる場合があることを示した。したがって、実際に設計する際には、有限要素法による詳細モデルを用いて事前に、エネルギー回生効率、平均流量などを検討しておくことが有用であると考えられる。

油圧ショベル等の建設機械において、電気系の昇圧チョッパ回路を油圧系に拡張して、油圧内部でのエネルギー回生を実現させる方法を考え、上述のような検討を行った結果、エネルギー回生メカニズムの把握、回生効率を向上させるための手法、実機的设计時にエネルギー回生性能を評価する方法などが得られた。得られた技術を発展させることにより、将来的には油圧ショベルなどの建設機械の更なる省エネルギー化が進むことが期待される。