

平成 30 年 6 月 29 日現在

機関番号：26402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13900

研究課題名(和文)油圧回路内でのエネルギー回生が可能な次世代油圧制御技術の研究

研究課題名(英文)New hydraulic control system regenerating energy in hydraulic circuit

研究代表者

井上 喜雄(Inoue, Yoshio)

高知工科大学・総合研究所・教授

研究者番号：50299369

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：PWM制御により油圧内部でエネルギーを回生することを考え、基礎技術を確立し油圧システムの省エネルギー化に貢献することをねらって研究を推進した。電気回路と比べ自由度が大きくバルブ圧損の非線形性や油の弾性の影響もある複雑な油圧システムのエネルギー回生について、系の動特性を考慮した近似による理論解を用いたモード解析とフーリエ級数展開を組み合わせた流量応答計算法およびエネルギー回生率を平均回生率と振動回生率の積で表現する評価法を提案するとともに、提案法により回生のメカニズムを明らかにし、パラメータの影響を把握することができた。また、実験によりバルブ切換速度を十分確保することが重要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In consideration of regenerating energy in hydraulic system by using PWM control, we aimed to establish basic technology and contribute to energy saving of hydraulic system. Regarding energy regeneration of complicated hydraulic system which has larger degree of freedom compared with electric circuit, nonlinear pressure loss of valve and oil elasticity, we proposed a response analysis method combining modal analysis method using approximate theoretical solution based on the dynamic characteristics of the system and Fourier series expansion and an evaluation method expressing the energy regeneration rate by the product of the average regeneration rate and the oscillation regeneration rate. By using the proposed method, the mechanism of regeneration was clarified and the effect of the parameters could be grasped. From the experimental results it could be seen that it is important to secure a sufficient valve switching speed.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 省エネルギー 油圧システム エネルギー回生 PWM制御

1. 研究開始当初の背景

油圧システムは電動モータとくらべて効率は悪いが、単位質量あたりの力が大きいことから大型の建設機械などでよく用いられている。しかし、近年、油圧機械でも省エネルギー性能が極めて重要な要素になってきており、油圧ショベルでは、旋回について、ハイブリッド車などと同様の電動モータとバッテリーを用いるエネルギー回生技術を搭載した機種が商品化されている。しかし、バッテリーは高価であり、油圧内部でのエネルギー解析技術に対するニーズは大きくなっているが、その実用化はあまり進んでいない。

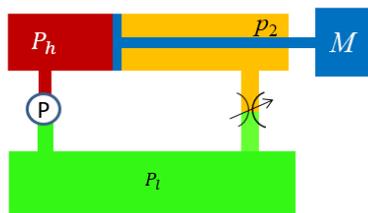


図1 現状の絞り弁による速度制御

現状の油圧系の速度制御は、例えば、速度ならびに運動エネルギーを有する油圧シリンダのピストンに接続しているアームやバケットなどの質量を減速させる場合には図1のように絞り弁の圧力損失によりブレーキ圧を発生させている場合が多く、速度を有している質量の運動エネルギーは全て消散してしまう。従来技術を組み合わせた省エネルギー技術により年々効率は上昇しているものの、新しい省エネルギー技術に対するニーズは大きいと考えられる。

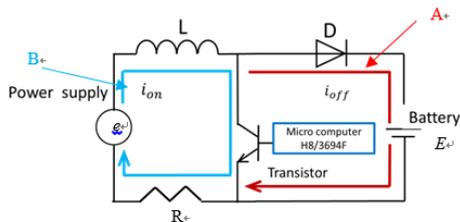


図2 昇圧チョップ回路

油圧系の流量と電気系の電流、油圧系の圧力と電気系の電圧とを対応させれば、油圧系は電気系と相似した関係があると言える。電気系では、図2のように古くからPWM制御を用いたエネルギー回生技術である昇圧チョップ回路が用いられており、電気自動車やハイブリッド車では、その方式が用いられている。PWM制御によりバッテリーを含む回路と含まない回路を高速で切り替えることにより、発電機などで発生した電圧がバッテリーの電圧よりも低くてもインダクタンスに蓄えられた電気エネルギー（機械系の運動エネルギーに相当）を放出することによって、発電電圧よりも大きいバッテリーの電圧に打ち勝つ電圧（機械系では慣性力）を発生さ

せることにより充電でき、また、PWM制御であるので、一定電圧のバッテリーであっても、PWM制御のデューティ比（1周期中のバッテリーのある回路へ接続している時間の割合）を変えれば、発電機の電圧に抵抗する電圧を自由に設定できるので、その結果電流を自由に制御することが可能となる。電気回路の微分方程式は電流1自由度の1階の微分方程式で表現できるので、理論解も得やすく、見通しを得ながら回路の設計が可能となる。

2. 研究の目的

電気系でのエネルギー回生に応用されているPWM制御を用いた昇圧チョップによるエネルギー回生技術の概念を油圧系に展開してPWM制御により油圧内部（高压源）で歪エネルギーとしてエネルギーを回生することを考え、その基礎技術を確立することにより、今後の油圧システムの省エネルギー化に貢献することをねらう。

油圧系は電気系と相似した関係を有しているものの、1自由度で表現できる単純な電気系と比べて、油の弾性が存在すること、油圧シリンダのピストンに接続した質量などにより自由度が多いこと、バルブの特性が非線形であること、電気系と比べて切換速度が遅いことなど電気系よりも複雑なシステムである。そのように複雑な油圧システムのエネルギー回生の可能性を確認するとともに、そのメカニズムを明らかにしてパラメータの影響を現象と結びつけて見通しよく把握することを目指す。

3. 研究の方法

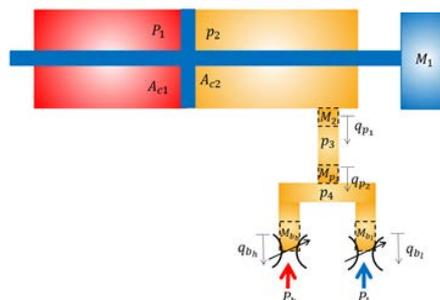


図3 PWM制御による速度制御

建設機械などで用いられている典型的な油圧システムにおいて、運動している油圧シリンダのピストンおよびそれに接続した質量をメータアウト側でブレーキ圧を発生させて減速させる場合に、図1のように従来の絞り弁の圧力損失で発生させていたブレーキ圧では質量の運動エネルギーは消散してしまうので、そのかわりに図3のようなシステムでPWM制御により高压源と低压源を高速の弁操作のより切換えることによってブレーキ圧を発生させ、その時に高压源側へ油

が流れることによって歪エネルギーとして油圧系内部でエネルギーを回生することを考え、その可能性を調べるために、電気系よりも複雑な典型的な油圧系の負荷およびシリンダからメータアウト側を多自由度ばね・質量・減衰系でモデル化し、バルブ切換えによる圧力の変化を外力として扱い、時刻歴応答シミュレーションを行いエネルギー回生の可能性の確認を行う。

上記の数値シミュレーションだけでは、見通しが得られないため、そのための初期モデルとして、まず、電気系の PWM 制御と同様の図 4 のような 1 自由度モデル線形モデル電気系のインダクタンスに配管系の等価質量、電気系の抵抗に油圧系の圧損による減衰を対応させて理論解を求め、パラメータの影響を検討する。ただし、線形 1 自由度モデルでは、バルブの非線形減衰、油の弾性の影響、油圧シリンダ部のピストンやそれに接続する質量により自由度が増加する効果は考慮できないため、1 自由度モデルが使用できる範囲を調べる。

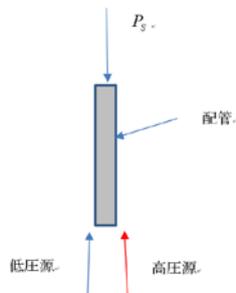


図 4 剛体 1 自由度モデル

次に 1 自由度モデルでの見通しのよさと弾性の影響やシリンダなどの質量の影響を考慮できることを両立させる新しい解析手法を検討する。まず、バルブの非線形減衰特性に対しては、図 5 のような外力となるバルブ切換えによる圧力変動を平均圧と振動圧の和で表現し、平均圧に対する定常流量については、バルブの非線形減衰を考慮して計算する。すなわち、配管の圧損は、層流抵抗となると考えられ線形の減衰で表現できるので、系の全圧損と平均流量の関係は流量の 2 乗に比例する項と流量に比例する項の和で表現できる。

平均流量に関する 2 次方程式である圧損の式を解けば非線形減衰を考慮した流量が得られる。

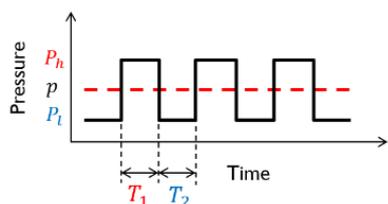


図 5 バルブ切換えによる外力

振動流量の計算には、平均流量のまわりの微小な変動に対して近似的に用いられる手法を用いる。本テーマの場合には、微小変動とはみなせない場合も多いが、ここでは前述の近似解法を拡張して適用し、非線形減衰を平均流量まわりで線形化した等価線形減衰を用いて、電気系と同様の理論解を振動流量として求め、平均流量と振動流量の和として流量応答を求める方法を用いることを考える。その方法による計算結果と非線形を考慮した時刻歴応答計算結果と比較してどこまで適用できるかを検討する。

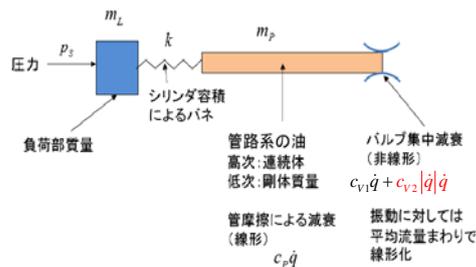


図 6 モード解析のためのモデル化

次に、油の弾性の影響、油圧シリンダなどが加わることによる自由度の増加を考慮しても見通しが得られる方法として、モード解析による周波数応答と外力のフーリエ級数展開を用いる方法を提案する。

複雑な系ではあるがモード解析に用いるモーダルパラメータは、数値解析ではなく理論で求められるような工夫を行う。油の圧縮性を考慮しメータアウト側を図 6 のようにモデル化し、配管部分は連続体とするが、そのままでは理論的にモーダルパラメータを得ることは難しいので、複数のモードのうち剛体モード、2 次モードについては、周波数が低く油の弾性の影響は無視できるので剛体としてあつかい、3 次以降の配管系が中心のモードについては、シリンダおよび付加質量の影響が無視できるとして連続体としての両端フリーの配管系の理論解を用いることにより、すべてのモーダルパラメータを陽な形で理論解で求める。

それらを用いて振動圧力に対する流量の周波数応答を計算し、それと外力をフーリエ級数展開したものから振動流量を計算し、それに平均流量を加えて応答流量を求める。

以上のプロセスでパラメータの応答流量に対する見通しは良くなる。さらにそれがエネルギー回生効率にどのように影響するかを現象と関係づけて理解するために、回生効率（油圧系に流入したエネルギーに対する高圧源に歪エネルギーとして回生されるエネルギーの割合）を平均回生率と振動回生率の積で表現することを提案する。

提案した解析手法ならびに評価手法を典型的な油圧システムに適用してパラメータの平均回生率、振動回生率への影響を現象と

結びつけながら検討するとともに、実験により理論的に検討してきた内容の確認を行う。

4. 研究成果

研究の方法で示した多自由度モデルでの流量の時刻歴応答の計算、電気系 PWM 制御と同等で考え方の基本となり見通しが得られやすい線形 1 自由度系での理論解析、非線形減衰の影響を考慮するための平均流量と振動流量を分離して計算する方法、モード解析とフーリエ級数展開を用いて自由度の増加および弾性の影響を考慮することと見通しのよさを両立させる方法、実験、などによる一連の検討から得られた現象のメカニズムやパラメータの影響に関する知見を整理しまとめた結果を以下に示す。

線形 1 自由度剛体モデルおよびそれに非線形減衰を考慮した方法では、以下のような結果が得られた。

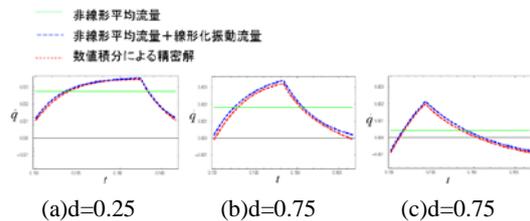


図 7 非線形減衰への対応

上図で緑は平均流量、赤は精密解、青は提案法による解であるが、(a)の振動流量が平均流量と比べて小さい場合だけでなく、変動が大きい(b), (c)でも比較的良好に一致している。これは、(b), (c)では平均流量が小さくなり、非線形の圧損の式のなかの流量の 2 乗の非線形項の影響が小さくなり、線形系に近づいているためであると考えられ、本テーマで用いる油圧モデルでは十分近似解法として使用できることがわかった。

油の弾性の影響と油圧シリンダのピストンおよび付加質量の影響を考慮してモード解析で計算する場合には、1 次、2 次は油を剛体と仮定したことにより 1 次の剛体モード 2 次の逆相モードのモーダルパラメータは、陽な形の理論式で計算できる。また、3 次以降は、管路系の油が変形するモードであり、2 次と比べて周波数がかなり高くなるので、簡単のためシリンダおよび負荷からの影響を無視すれば、3 次以降は両端自由の管路系の固有振動数となることを用いることによって、すべてのモーダルパラメータを陽な形の理論式で表現できる見通しのよい方法を提案することができた。

一方、3 種類のデューティ比の場合について外力である振動圧をフーリエ級数展開した結果を下図に示すが、これらの例では高調波の次数が高くなれば、影響は小さくなっていることがわかる。

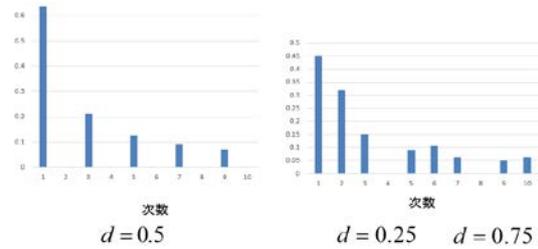


図 8 外力のフーリエ級数展開

これらの結果と周波数応答関数から振動流量を計算した結果と非線形減衰を考慮して計算した平均流量の和として計算した応答流量を下図に示す。

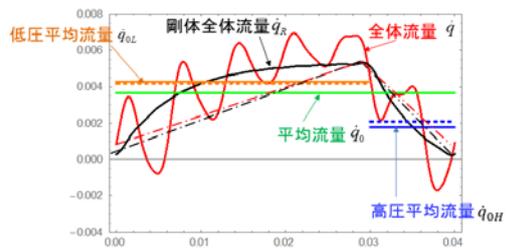


図 9 平均流量および応答流量

図で赤色は提案法による応答流量で緑色は平均流量、黒が剛体 1 自由度モデル（非線形減衰考慮）での応答流量である。橙色実線は低圧接続時の平均流量、青色実線は高圧接続時の平均流量である。

流量応答とエネルギー回生率との関係を理解するのに、回生率を平均回生率と振動回生率の積で表現した結果、現象と結びつけて理解しやすくなることを示した。すなわち、平均流量に対する圧損が大きくなるほど平均回生率が低下することが確認され、圧損はできるだけ小さいほうがよいことがわかった。また、振動回生率は全体の平均流量に対する高圧接続時の平均流量の比で表現されることがわかった。

弾性の影響との関連が深い切換周波数を変更した場合の振動回生率（平均回生率には影響しない）の変化を図に赤色で示す。

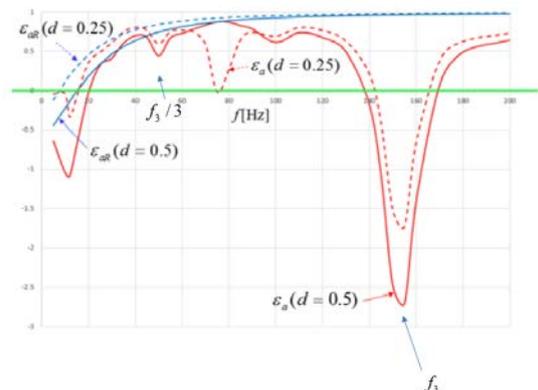


図 10 切換え周波数の振動回生率への影響

図には1自由度剛体モデルによる結果も青色で示しているが、剛体モデルの場合には振動数に対して振動回生率が単調増加で1に近づいていくのに対して、弾性を考慮した場合には、2次の共振を通過した後は、しばらく剛体と同様の傾向を示すが、それ以降は、切換え周波数の3次の高調波、2次の高調波、基本周波数が3次の固有振動数（配管系の1次）と共振するごとに振動回生率の低下がみられる。したがって、40Hzあたり（3次の固有振動数の1/4あたり）までは、剛体モデルの理論でも予測できるが、このような直管の配管系ではそれ以降は、切換え周波数を上げてでもなかなか振動回生率を上げるのは難しいと言える。

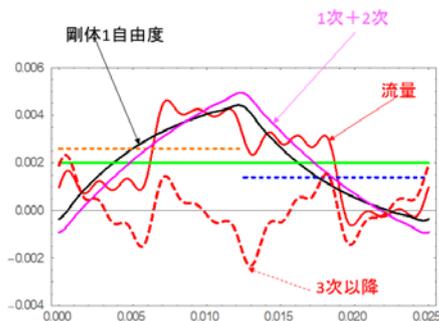


図 11 低次と高次モード別の応答流量

図のなかで良好な結果を示している切換え周波数が40Hzの場合について、その応答波形を詳しく調べ、振動回生率を現象と結びつけて検討した。図11では、剛体1自由度での応答流量（黒実線）、平均流量+2次以下の応答成分（桃色実線）、3次以降応答の成分の和（赤破線）を示しているが、2次以下までの応答の和であれば、剛体1自由度の場合と傾向はかわらず、ピストン部の減衰を調整すれば、両者（黒色と桃色）はほぼ一致する。また、3次以降の和については低圧接続時と高圧接続時での平均流量にあまり差がないが、2次以下の項の和については低圧接続時の凸と高圧接続時の凹の効果で高圧時の平均流量が全体の平均流量よりも小さくなってしまふことが、振動回生率を低下させることに効いていることになり、その程度は減衰が大きくなると大きくなる。

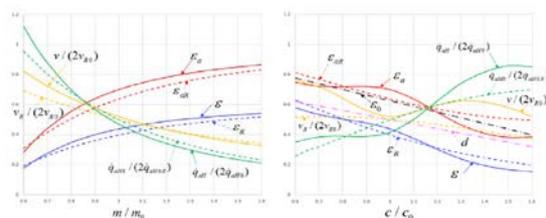


図 12 配管の質量・減衰の回生率への影響

この安定した結果が得られる切換え周波数において、配管系の固有振動数は変化させない条件（配管の長さを変更しない状態）で、

配管系の等価質量、等価減衰を変化させた結果を上図に示す。質量は振動回生率のみに影響するが、質量を大きくすれば、振幅（振動流量の実効値）、振動回生率いずれも減少していく。モード質量が増加することからそのことは理解でき、現象の基礎と位置付けられる剛体1自由度での現象とも一致する。減衰を変更する場合には、平均流量が一定になるようにデューティ比を調整しているが、減衰を増加させると、まず平均回生率が低下する。デューティ比が変化することによる加振成分変化に影響はあるが、傾向としては振幅は減少していくが振動回生率は低下していく。このことは剛体1自由度系での結果と同様で振幅が減少することよりも波形が膨らむ効果が大きいことが効いている。一方、3次以降では共振にかかっている場合は減衰により振幅、振動回生率の両者が改善するが、共振の影響が少ない40Hzでは高次への影響よりも、2次以下への影響のほうが支配的であることが関係している。

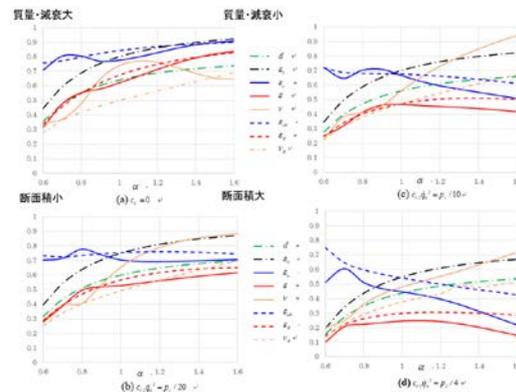


図 13 配管断面積の回生率への影響

実際の配管系において固有振動数を変化させずに等価質量や等価減衰を変化させるには、断面積を変化させることが考えられるが、質量、減衰単独では変更できず、両者同時に変わってしまう。配管部の等価質量は断面積に逆比例、等価減衰は断面積の2乗に逆比例するが、質量と減衰の回生効率に対する効果が逆であるので、最適な断面積が存在し、その大きさは、配管以外のバルブなどの減衰の大きさによって変化することがわかった。上図にバルブの減衰を変化させた場合の結果を示しているが、回生効率（赤色実線）がピークを示す断面積がバルブの減衰によって異なるという結果が得られた。

実験では、切換えバルブの応答が予想以上に遅く、バルブ切換えの間に油が漏れることに起因して十分な回生ができなかったが、

漏れを考慮した詳細な数値シミュレーションにより検討した結果、バルブの応答を速めることによって漏れが減少していき、回生の状況が改善していくという結果が得られ、バルブ切換え速度により回生効率が大きく

影響されることが確認できた。このことから、PWM 制御による油圧システムのエネルギー回生には、高速のバルブ切換えが非常に重要であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計6件)

- (1)井上喜雄, 立花邦彦, 前川智史, 園部元康, 芝田京子, PWM 制御を用いた油圧システムのエネルギー回生 (回生効率の改善), 日本機械学会第 55 期中国四国支部総会講演会,2018, 1104.
- (2) 前川智史, 井上喜雄, 園部元康, 菅野直紀, PWM 制御を用いた油圧システムのエネルギー回生 (反共振現象の利用), MoVic2017, 2017, B09.
- (3)井上喜雄, 立花邦彦, 前川智史, 園部元康, モード解析による PWM 油圧制御システムの近似応答解析, 日本機械学会 MoViC2017, 2017, B10.
- (4) 井上喜雄, 立花邦彦, 園部元康, 芝田京子, PWM 制御を用いた油圧システムのエネルギー回生 (油の弾性の影響), 日本機械学会第 55 期中国四国支部総会講演会,2017, 1112.
- (5)前川智史, 井上喜雄, 菅野直紀, 金井啓太, 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関する研究, 日本機械学会 D&D2016, 2016, 435.
- (6)井上喜雄, 金井啓太, 芝田京子, 立花邦彦, PWM 制御を用いたエネルギー回生, 日本機械学会第 54 期中国四国支部総会講演会 2016, 512.

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 喜雄 (INOUE, Yoshio)
高知工科大学・総合研究所・教授
研究者番号：50299369

(2)研究分担者

立花 邦彦(TACHIBANA, Kunihiko)
高知工科大学・総合研究所・助教
研究者番号：10747794