

油圧パワーステアリングの動的挙動解析

徳本欣智

Dynamic Behavior Analysis on Hydraulic Power Steering System

Y. TOKUMOTO

Research regarding dynamic modeling of hydraulic power steering system has been conducted. Unexpected phenomena, which disturbed the driver's feeling in hydraulic power steering systems, were analyzed. Due to the proposed modeling of power steering, these unexpected phenomena have been logically simulated by the proposed modeling for power steering, and the optimum parameters for steering designs could be obtained.

- 1. はじめに
- 2. 油圧パワーステアリングシステムの解析
 - 2.1 解析モデルの作成
 - 2.2 解析モデルの力の釣り合い
- 3. キックバック現象への適用
 - 3.1 キックバック現象
 - 3.2 ベンチ上でのキックバック現象再現試験
 - 3.3 実験結果とシミュレーション結果との比較
 - 3.4 キックバックの考察
- 4. 異音への適用
 - 4.1 据え切り時の異音
 - 4.2 経験におけるグー音の発生状況
 - 4.3 シミュレーション結果
 - 4.4 グー音の考察
- 5. おわりに

1. はじめに

パワーステアリングはドライバーが小さな力で快適に自動車のハンドル操作を実現する手段である。

しかし、パワーステアリングの普及率が日本国内に見られるようにほぼ100%の域まで到達すると、ドライバーのニーズはハンドル操舵力の軽減だけでは満足されない。近年、特にパワーステアリングに対して静粛性の向上、操舵フィーリングの向上といった性能追求を求める声が高い。しかし、現実には、これらの技術的な改良は試作段階での経験的な積み重ねが多く、その原因に対する解析的なアプローチは必ずしも十分ではない。

本報では、現在最も広く用いられている油圧パワーステアリングを取り上げ、異音およびキックバック現象について動的挙動解析を行ったので報告を行う。

2. 油圧パワーステアリングシステムの解析

2.1 解析モデルの作成

油圧パワーステアリングを解析するにあたり、パワーステアリングシステムを構成する機械要素を極力、解析モデルに織り込むように心掛けた。今回の解析に用いたパワーステアリングシステムの力学解析モデルを図1に示す。パワーステアリングの型式はラックアンドピニオン式で、機械的にハンドルとラック軸は連結されている。また、コントロールバルブはトーションバーを介して構成されている。

ハンドルに操舵力(もしくはタイヤ側から外部負荷)を与えることによってこのシステムは動作する。

ここで、パワーステアリングの構成部品が加速度運動を行う時の遅れを慣性、またトーションバーが捻じれることによって生ずるバルブの圧力特性を比例項によってモデルを定義した。特に高圧時のホー

自動車技術会'98年春季講演で発表

スの膨張による圧力遅れをばね・粘性要素で、タイヤ側負荷(路面との接地力)を摩擦・ばね要素で等価的に置き換えた。このモデルを用いてパワーステアリングの動的挙動解析を行った。

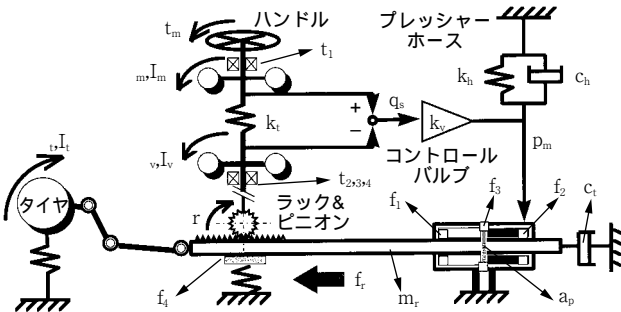


図1 ステアリングシステムモデル
Steering system model

- t_m : ハンドル操舵トルク
- I_m : ハンドルホイールの慣性モーメント
- I_v : ピニオン回転軸回りの慣性モーメント
- I_t : キングピン軸回りのタイヤ慣性モーメント
- m : ハンドル舵角
- v : ピニオン舵角
- t : タイヤ舵角
- k_t : トーションバーばね定数
- k_h : ホース変形ばね係数
- a_p : ピストン受圧面積
- p_m : コントロールバルブ圧力
- q_s : ポンプ吐出流量
- k_v : コントロールバルブゲイン
- m_r : ラック軸質量
- r : ピニオン噛み合い半径
- c_t : ラック軸変位速度に伴う粘性係数
- c_h : ホース膨張粘性係数
- f_t : ラック軸出力
- t_1 : オイルシール摩擦トルク(ハンドル側)
- t_2 : コントロールバルブシール摩擦トルク
(高圧側)
- t_3 : コントロールバルブシール摩擦トルク
(低圧側)
- t_4 : オイルシール摩擦トルク(ピニオン側)
- f_1 : シリンダーシール摩擦力(低圧側)
- f_2 : シリンダーシール摩擦力(高圧側)
- f_3 : ピストンシール摩擦力
- f_4 : 摺動部材の摩擦力

2.2 解析モデルの力の釣り合い

パワーステアリングの作動を簡略なサーボモデルで表現した図1からパワーステアリングの各部の力の関係式を求めた。

①ハンドルとトーションバー間の力の釣り合い式

ドライバーがハンドルに操舵トルクを加えた時、慣性モーメントを持ったハンドルホイールの加速度運動による反力トルク、擦じられたトーションバーの位相差によるばね反力トルク、オイルシールの摩擦トルクが生じる。したがって次式の関係が成立する。

$$t_m = I_m \ddot{m} + t_1 + k_t(m - v) \quad (1)$$

②トーションバーとラック軸間の力の釣り合い式

ドライバーの操舵によってポンプから油圧駆動力を受けたピストンはラック軸を1自由度で水平運動する。この時トーションバーの擦じれトルクはドライバーのマニュアル力としてラック軸の運動に作用する。一方、ピニオン軸回りの慣性モーメント、ラック軸重量、オイルシール摩擦はラック軸運動の抵抗力として作用するので次式の関係が成立する。

$$f_t = a_p p_m - (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) - m_r \ddot{v} - c_t \dot{v} - \{k_t(m - v) - (t_2 + t_3 + t_4) - I_v \ddot{v}\} r \quad (2)$$

③コントロールバルブとホース間の圧力の伝達式

ドライバーの操舵トルクによってコントロールバルブが開閉されると静的には操舵トルクに応じたバルブ圧力が生じる。しかし、実機ではポンプ吐出圧の変化によるホースの体積変化が伴い、コントロールバルブの圧力遅れが生ずることが容易に予想される。ホースが膨張時、ポンプから吐出される作動油がホースの膨張に費やされると仮定し、コントロールバルブ圧力 p_m を以下の変数を持つ関数で定義した。

$$p_m = F(q_s, k_v, k_h, c_h, m, v) \quad (3)$$

タイヤと路面間の摩擦によるラック軸の駆動必要力

路面とタイヤの接地形状が転舵角に応じて変形しないという仮定で、キングピンキャスト角とタイヤに負荷されている分担荷重から据え切り時においてタイヤ転舵に必要なキングピン駆動トルクの算出に関する報告¹⁾がある。

しかし、実機では路面とタイヤの接地形状は転舵角に応じて変形すると考えられる。この補正係数を実験的に求め、タイヤと路面間の摩擦によるラック軸の駆動必要力を次式のような変数を持つ関数で扱った。

$$f_r = F(\delta, R, N, f_s, n, r, \omega, \dot{\delta}, I_t) \quad (4)$$

- δ : キャスター角
- R : タイヤ半径
- N : 前輪分担荷重
- f_s : タイヤと路面の摩擦係数
- n : ハンドル/タイヤ舵角比

以上の(1)~(4)の釣り合い式を用いて、パワーステアリング固有の現象を解析した。

3. キックバック現象への適用

3.1 キックバック現象

車両走行中、ステアリングは路面から外乱を受けている。この時、ドライバーはハンドル反力トルクにより、外乱と認識している。この反力トルクをキックと定義する。外乱によるキックバック量が必要以上に大きいとドライバーは不快に感じてしまう。本報では、実機結果とシミュレーションの比較検討によりキックバック現象を考察した。

3.2 ベンチ上でのキックバック現象再現試験

実車走行試験においてキックバックが非常に大きいと評価されたパワーステアリングを試料として、図2および表1で示す試験方法でキックバック再現試験を行った。

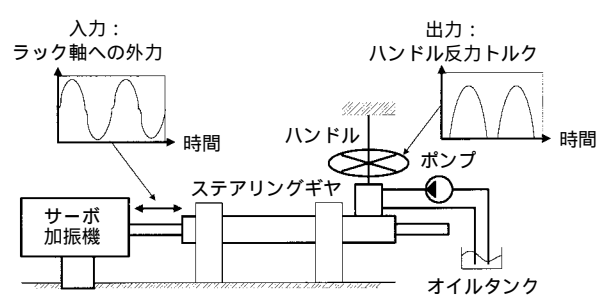


図2 キックバックの台上試験
Bench test of kick back

表1 試験条件
Test conditions

入力波形	正弦波
入力周波数	1 ~ 20Hz
最大入力	4 000N
油温	80
ポンプ吐出流量	$167 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$
ハンドル舵角	0 deg(固定)
ステアリング型番	3 ℓ クラス

3.3 実験結果とシミュレーション結果との比較

図2に示すベンチ試験で得られた実機測定結果と計算結果との比較を図3に示す。両者は精度良く一致していることがわかる。特にコントロールバルブ圧力については小さな圧力ピークと大きな圧力ピークが周期的に発生している特徴的な点も再現できている。

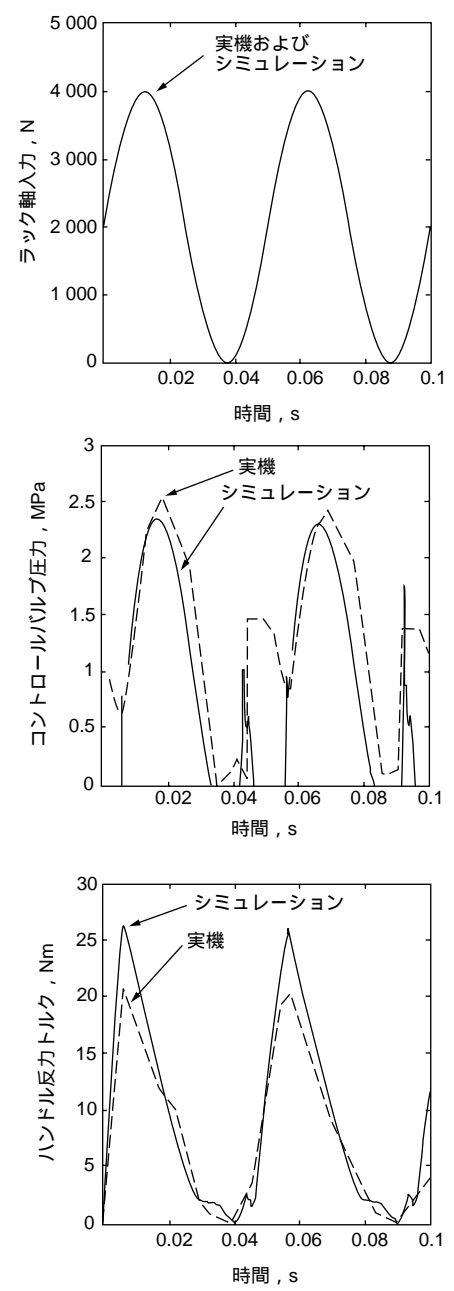


図3 実機とシミュレーションとの比較
Comparison between experiment and simulation

3.4 キックバックの考察

キックバックの発生した試作型番と発生していない型番それぞれの設計諸元をパラメータとしてシステムの周波数応答特性を計算した結果を図4に示す。ラック軸に外乱を加えた場合にハンドルホイールを保舵するのに要するトルクの大きさと位相を示している。

キックバックの発生した型番は外乱周波数が低い時(約20Hz)でも、すでに反力トルクのゲインが上昇しており、外乱に対して非常に敏感なサーボシステムとなっていることが分かる。キックバック現象の改善にはキックバックが問題となっている外乱周波数帯域に対してより安定なシステムを設計する必要がある。

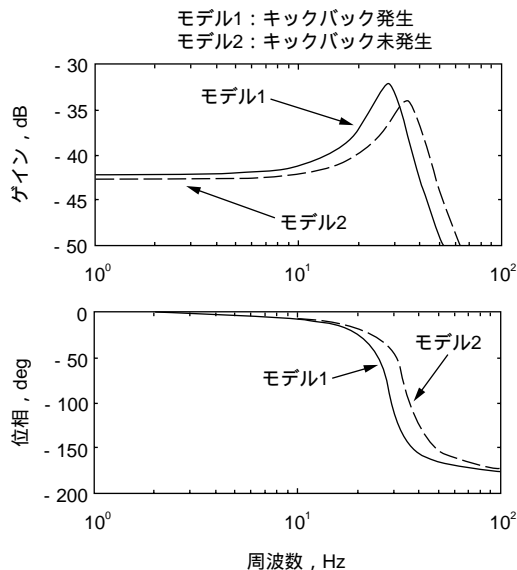


図4 キックバックの周波数特性
Frequency response of kick back

4. 異音への適用

4.1 据え切り時の異音

パワーステアリングはドライバーの操舵フィーリングに大きく寄与しているが、時としてドライバーに不快な振動もしくは音を与える場合がある。

ここでは据え切り時に見られる異常振動現象の一つを解析した。据え切り時に発生する異常振動としてハンドルを切り込んでいくと、擬似音で「ゲー」という比較的大きな音(以下「ゲー音」, Goo Noiseと称す)が聞き取れる場合がある。主たる原因については経験上既に分かっていたが、今回シミュレーションにより再現出来た。

4.2 経験におけるゲー音の発生状況

車両に搭載したパワーステアリングにゲー音が発生した場合でも、これをベンチ上で調査してみると、必ずしもゲー音が再現できるものばかりではない。これが解析的な手法を困惑させている一つの原因であった。車両に搭載したパワーステアリングのゲー音発生状況をドライバーの聴覚によって発生判定調査した結果²⁾を図5に示す。パワーステアリングの設計諸元とゲー音との間には明らかな相関がある。ゲー音はコントロールバルブ感度とホースの脈動減衰率と密接な関係があり、ほとんどの車両においてコントロールバルブ感度が矢印で示した値以下ではゲー音は発生しないことが分かる。したがって、ゲー音は油圧サーボシステムにおけるハンチング現象ではないかということが容易に推定できる。

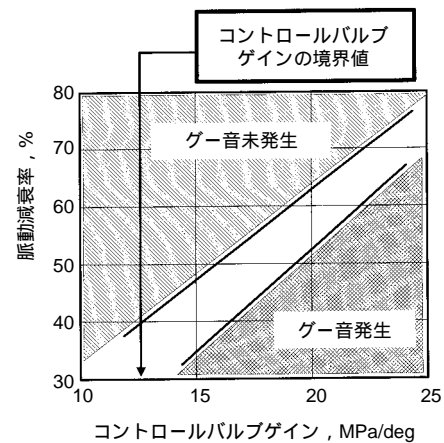


図5 ゲー音に関するコントロールバルブゲインの境界
Boundary value of control valve gain for goo noise

4.3 シミュレーション結果

先述した通りゲー音はベンチ上では必ずしも再現できないので、据え切り時の車両負荷条件(タイヤの車両分担荷重、路面摩擦、サスペンション等)に相当する負荷値を計算し、シミュレーションを実施した。また、シミュレーションではゲー音の原因そのものと考えられるコントロールバルブの圧力変動を計算した。シミュレーション結果を図6に示す。

図6 a)はゲー音が発生しなかったパワーステアリングの設計諸元をもとに、据え切り時の条件で操舵した場合のコントロールバルブ圧力をシミュレーションした結果である。圧力は瞬時に目標圧力(8MPa)に到達し、コントロールバルブ圧力は安定している。一方、図6 b)はゲー音が発生したパワーステアリングの設計諸元をもとに同様にシミュレーションした場合である。コン

トロールバルブ圧力がハンチングしている様子が計算できた。こうした圧力のハンチング現象によりプレッシャーホースが振動し、音の発生源となる。こうした発生音をゲー音としてドライバーは認識すると思われる。

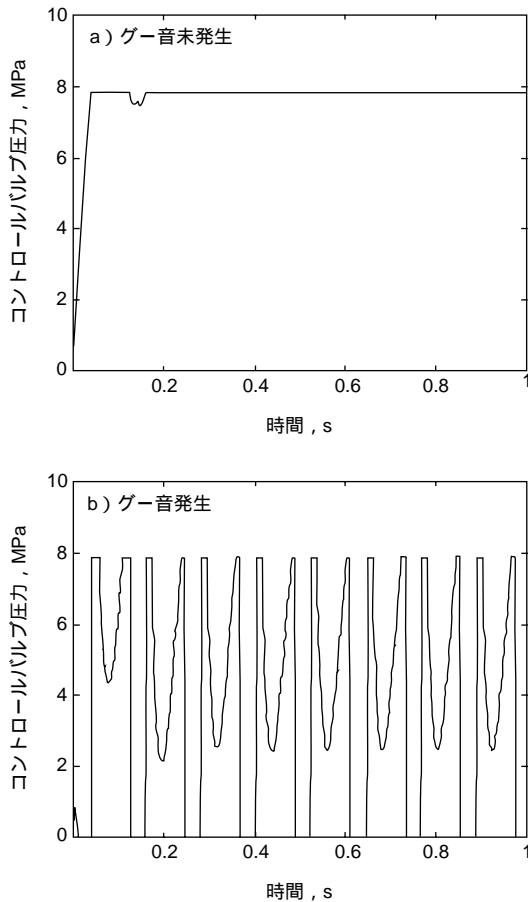


図6 コントロールバルブ圧力のシミュレーション結果
Simulation results of control valve pressure

4.4 ゲー音の考察

種々のパワーステアリング設計諸元とゲー音発生との関係をシミュレーションで予測してみた。また、ゲー音の発生を回避できる設計諸元の推奨値が実機との比較で明らかになった。

図7はシミュレーションを実施していく上で分かったゲー音発生に対して寄与度の大きいパワーステアリングの設計諸元とゲー音発生状況をマップ化したものである。図7のx,y,z軸で選定した設計パラメータはハンドルホイールの慣性モーメント、コントロールバルブ感度、配管ばね定数とした。様々なパワーステアリングの設計諸元に対してもコントロールバルブ感度が図7中の矢印で指し示した平面値以下であれば、シミュレーション上ではゲー音が発生しないことがわかる。また、このシミュレーション結果

は、図5で示した、経験上分かっていたゲー音回避の数値と一致する。したがって、シミュレーションモデルの信頼性が確認できた。

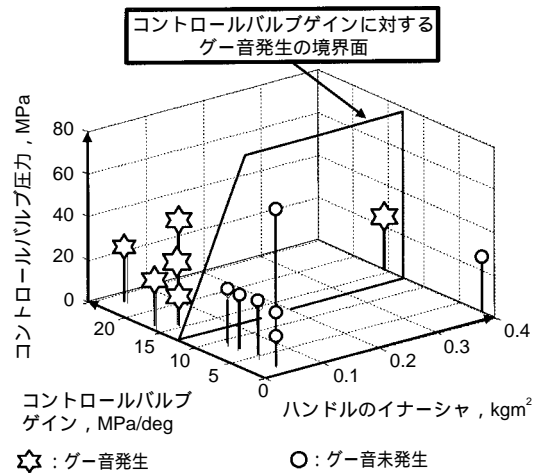


図7 ステアリング設計パラメータに対するゲー音の発生分布

Occurrence distribution of goo noise for steering design parameters

5. おわりに

ドライバーに不快な操舵フィーリングを与えるパワーステアリング固有の現象(キックバック、据え切り時のゲー音)を解析した。今回報告したパワーステアリング解析モデルを用いて、これらの現象を理論的に再現、もしくは回避できる設計パラメータの提案を行うことのできるシミュレーションシステムを構築できた。

本報ではドライバーに不快なフィーリングを与える現象のみを取り扱ってきた。今後は逆にドライバーにとって快適な特性を数値化しそれらのパワーステアリングの解析が検討できるシミュレーションシステムを構築していく必要がある。

参考文献

- 1) 稲葉正太郎：自動車技術18, vol.11(1964)899.
- 2) 小林正典：ギヤゲー音解析第2報, TD-3558-02X(1992)

筆 者



徳本欣智*

Y. TOKUMOTO

* 総合技術研究所 電子システム技術開発センター
制御要素開発部