

# パワーステアリングのハンマリング音のシミュレーション解析

小林正典 大嶋昭男

## Hammering Noise Simulation Analysis of Power Steering System

M. KOBAYASHI A. OHSHIMA

We have developed a simulation program to analyze hammering noise phenomenon and to compute return surge pressures which are the main cause of hammering noise. By changing the length of pressure pipe, return pipe and steel pipe or inserting a rubber pipe, the program has made it possible to study the optimal hose tuning in the limited vehicle space provided in the design stage.

*Key Words: hammering noise, simulation, hose tuning, power steering*

### 1. はじめに

近年、自動車の静粛化が進み、パワーステアリングシステムについても振動・騒音低減の要求が高まっている。これまで、パワーステアリングシステムの振動・騒音は、車両との関連性が大きく実車評価でしか判断できないことが多かったため、自動車メーカーの実車評価で最終チューニングするケースもあった。

しかし、ここ数年、車両の開発期間短縮に伴い、実車評価でのトライアンドエラーの猶予はなくなり、特に振動・騒音については、実車評価では最終確認のみが目的となってきた。したがって、この段階で不具合を出すことは、開発計画に対する遅れを生じさせることになる。

車両の開発期間短縮にも対応できるサプライヤとして信頼されるためには、一回の実車評価で良い結果を得ることが重要であり、そのためには実車評価の前に、事前検討できる予測技術の開発が必要になった。

### 2. パワーステアリング用配管に関する振動・騒音

パワーステアリング用配管に関する騒音は、配管そのものが主原因である場合は少ない。本来なら主原因となる部品で対策されるべき問題であっても、その部品の構造上の問題であったり、また、他の制約条件から回避できないなど、主原因となる部品での対策は実質上困難な場合が少なくない。このため、パワーステアリング用配管の役

割は単に油を導く配管としての機能だけでなく、新たに振動・騒音低減に対しても配慮することが必要になってきた。

パワーステアリングシステムにおける振動・騒音の中で、プレッシャ配管(高圧側)に関係する振動・騒音としては、ポンプゲ音、ギヤゲ音<sup>1)</sup>、ハンドル振動があるが、いずれもシミュレーションプログラムが完成し、プレッシャホース製作前の事前検討が可能になった。

今回、リターン配管(低圧側)に関係する振動・騒音として、ハンマリング音を取り上げ、シミュレーションプログラムを開発した。本開発をもって、パワーステアリング用配管に関するシミュレーションはすべて完成した。

### 3. ハンマリング音の現象分析

#### 3.1 ハンマリング音とは

悪路走行時、路面からの入力によりバルブの開閉が生じ、これによりリターン回路に油撃(油で配管を打撃する作用)が生じ、異音が発生する場合がある。対策の方向としてはリターン配管のバルブに近い部分に適量のゴム管を挿入することで低減できることが知られているが、限られた実車レイアウトの中から、どの程度バルブに近い部分にどの程度のゴム管を挿入すれば効果があるか実車での試行錯誤になる場合が多い。

今回、シミュレーション解析を行うにあたり、ハンマリング音の現象を正確に分析するため、下記実験を行った。

3.2 実験

ハンマリング音が実際に発生するのは悪路走行時であるが、実車での悪路走行ではさまざまな音が混在するため、人間の耳にはかろうじて分類できるものの、計測データからハンマリング音の信号を特定することは困難である。したがって、図1に示す方法でハンマリング音以外の音があまり発生しないように工夫して、悪路走行の模擬実験を行った。

エンジンONの結果を図2、エンジンOFFの結果を図3に示す。

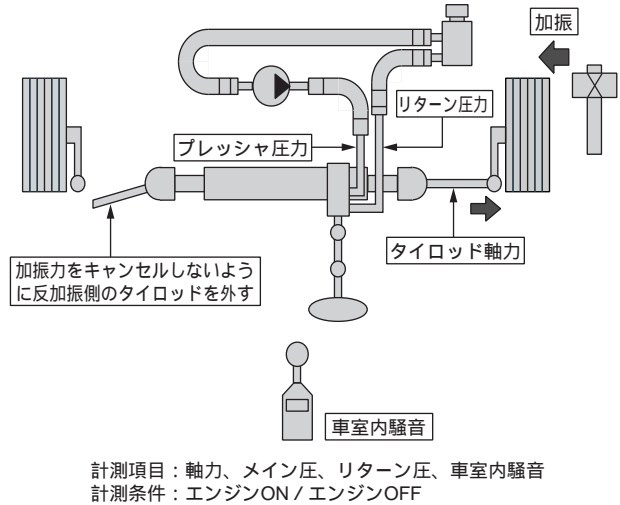


図1 試験方法  
Test method

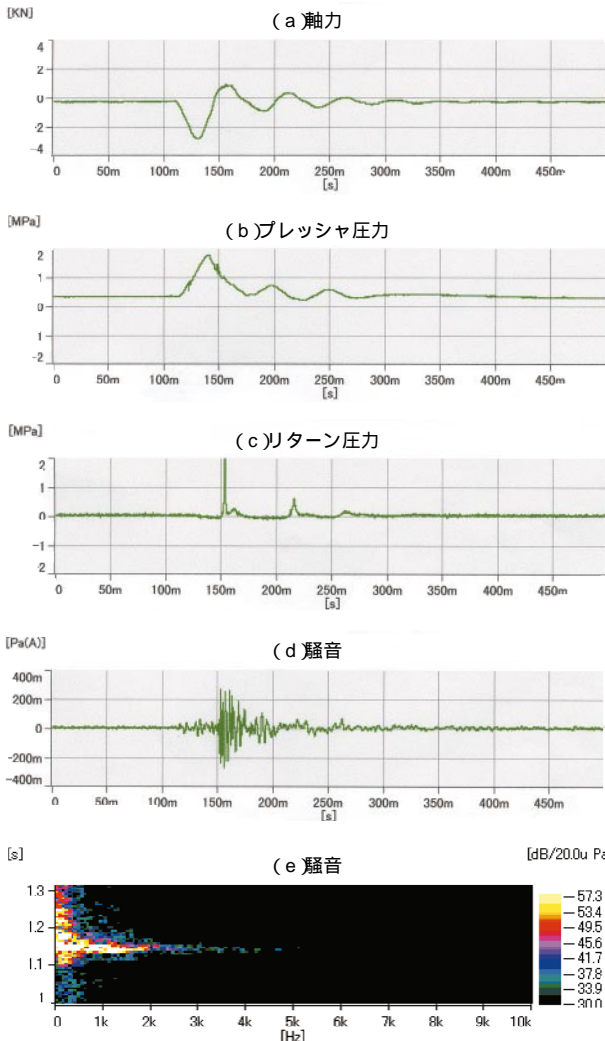


図2 エンジンONでの計測結果  
Measurement results with engine ON

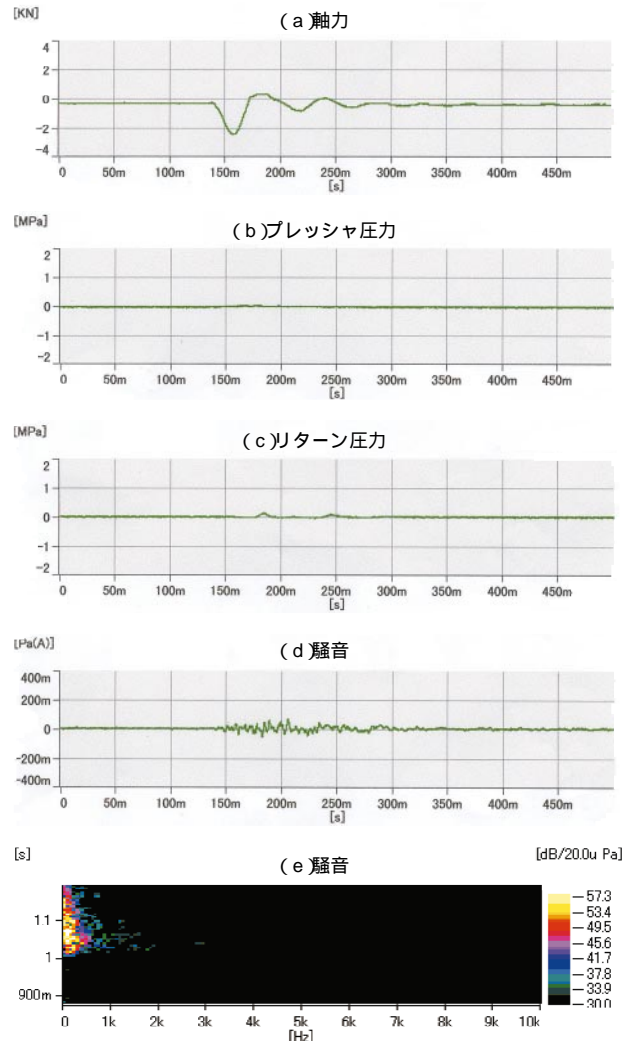


図3 エンジンOFFでの計測結果  
Measurement results with engine OFF

この実験により、以下のことが明確になった。  
 ハンマリング音が発生するのはエンジンONの時のみ(図2(d), 図3(d))  
 音の周波数は500Hz ~ 2 KHz(図2(e))  
 音はサージ圧の発生とほぼ同タイミングで発生(図2(c), 図2(d))  
 聴覚判断ではサージ圧 1 MPa以下ではタイヤを打撃する音にまぎれて聞き取れない。  
 リターン配管内の圧力はサージ圧発生前後で一定値(-0.07MPa)となる時間帯があるのでリターン配管内に蒸気空洞が発生していると考えられる。

この結果より、音とサージ圧とは相関があることが明らかになった。

さらに、この計測データを基に、サージ圧発生のメカニズムを以下のように考える。

### 3.3 サージ圧発生のメカニズム

悪路走行でバルブに急激な開閉が生じた場合のバルブ周辺の油の流れを図4のように考察した。

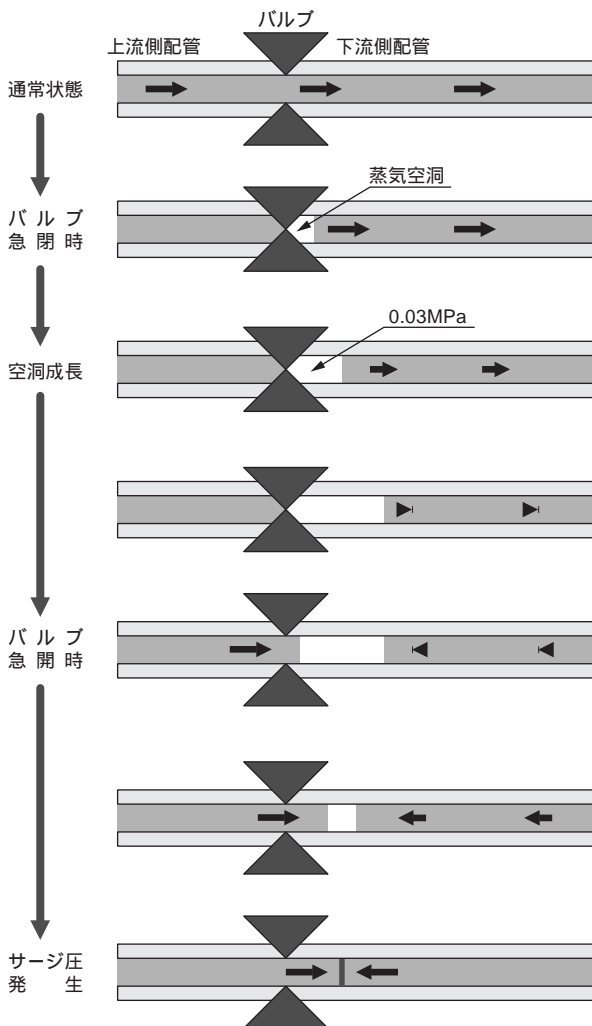


図4 バルブ周辺の油の流れ  
Oil flow around valve

通常、バルブは開いているので、油圧回路には一定流量の油が流れている。  
 急にバルブが閉じるとバルブよりも下流側の油は急には止まらず、慣性力によりそのまま流れようとする。しかし、バルブは閉じられているため上流からは油は補充されない。したがって、この間に蒸気空洞が発生する。  
 この空洞の圧力は絶対圧で0.03MPaで、大気圧から比べると-0.07MPaであるので、空洞が存在する限り下流側の油は常に上流側に引っ張られている。  
 やがて下流側の油は引き戻されるが、ちょうどそのころバルブが開いたとすると上流側から流れてきた勢いのある油が流れ込む。  
 下流側から引き戻された油と上流側から流れてきた勢いのある油が衝突して衝撃圧(サージ圧)が発生する。

## 4. シミュレーションの検討

### 4.1 シミュレーションの概念

音とリターンサージ圧には相関があることが判明したので、本シミュレーションでは配管内の圧力をシミュレーションすることで、ハンマリング音の机上検討用としての目的を達成できると考えた。実際に音のシミュレーションは困難としても、サージ圧のシミュレーションならば油の流れを追って行けば不可能ではない。

油圧の時間的変化を計算する手法として、特性曲線法を用いて、配管内の油を細かく分割し、分割要素に対し運動方程式および連続の式を適用した。この際の分割の方法を図5に示す。

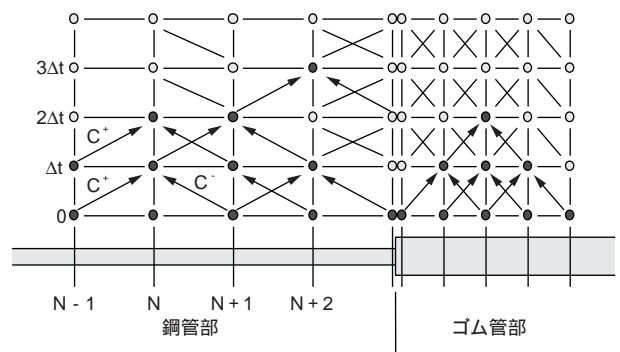


図5 配管の分割方法と圧力伝播

Division of pipes and pressure propagation

パワーステアリング用配管は鋼管とゴム管で構成される。分割の方法は鋼管、ゴム管にかかわらず、微小時間 $\Delta t$ で圧力が伝播する距離を目安に分割する。したがって圧力伝播速度の速い鋼管部は長く、圧力伝播速度の遅いゴム管部は短く分割す

ることになるが、こうしておく、 $\Delta t$ 秒後の圧力の計算が容易になる。もし、ある時刻での各分割格子点における状態(圧力、流速)がすべてわかっているなら、その分割された流体の微小時間 $\Delta t$ 秒後の状態(圧力、流速)を計算することはそれほど困難ではない。この計算結果を基にさらに $\Delta t$ 秒後の各部の状態も計算できる。初期での各分割格子点における状態(圧力、流速)は既知であるので、これをスタートとして計算を繰り返すことにより $\Delta t$ 秒後ごとに各分割格子点の状態(圧力、流速)を次々と求めることができる。

負圧発生時の計算においては、蒸気空洞モデル<sup>2)3)</sup>を適用した。実際に上記モデルのまま計算していくと、絶対圧力がマイナスの値になる場合が生じ、計算結果は実際の現象とは異なってしまふ。液体の性質として、液体は圧縮に対しては強いが引っ張りに対しては気化(蒸発)する性質がある。そのため、一旦蒸気空洞が発生すればその後空洞が消滅するまでの間、圧力はその液体固有の蒸気圧で一定の値になり、絶対圧力がマイナスの値になることはない。このような現象をうまく取り扱う方法として、蒸気空洞モデルが都合よく当てはまった。

シミュレーション結果が実際に精度良く再現できるかどうかは、負圧発生時の現象をいかにうまく取り扱うことができるかで決まる。

4.2 シミュレーションの基礎式

管路の断面上の圧力分布および流速分布は一様であるとした1次元流れにおいて、管路の摩擦抵抗を定常層流摩擦とすると、油の速度を $u$ 、位置を $x$ として管内の油の運動方程式および連続の式から次の2組の常微分方程式が得られる<sup>4)5)</sup>。

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} + \frac{1}{c} \frac{dp}{dt} + \frac{32}{D^2} u = 0 & (1) \\ \frac{dx}{dt} = u + c (C^+) & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} - \frac{1}{c} \frac{dp}{dt} + \frac{32}{D^2} u = 0 & (3) \\ \frac{dx}{dt} = u - c (C^-) & (4) \end{cases}$$

ここで、 $\rho$ は油の密度、 $c$ は圧力波の伝搬速度、 $\mu$ は油の動粘度、 $D$ は管の内径である。図6に示す $x-t$ 面上において、式(1)は式(2)を満足する特性曲線 $C^+$ で成立し、式(2)は式(3)を満足する特性曲線 $C^-$ で成立する。従って、 $R$ および $S$ 点の圧力と流速が得られれば、 $\Delta t$ 秒後の $T$ 点の圧力と流速を求めることができる。図中の $A$ 、 $B$ 、 $C$ 点での圧力、流速がわかっているれば $R$ 、 $S$ 点はそれぞれ線形補間によって求める。

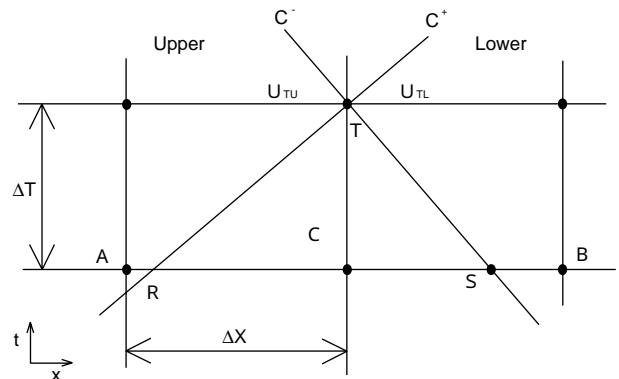


図6 特性曲線  
Characteristic curve

4.3 蒸気空洞モデルの適用

式(1)~式(4)を差分化し、図7の配管に適用する。この際、計算上圧力が油の蒸気圧以下になる場合は蒸気空洞モデルを適用し、次の各式(5)~(6)が得られる。

油の蒸気圧を $P_v$ 、 $T$ 点の上流側流速を $U_{TU}$ 、下流側流速を $U_{TL}$ とすると、蒸気空洞の発生しない時( $P_T > P_v$ の場合)

$$U_{TU} = \{ U_R + U_S + (P_R - P_S) / (C^-) - 32 (U_R + U_S) \Delta T / D^2 \} / 2 \quad (5)$$

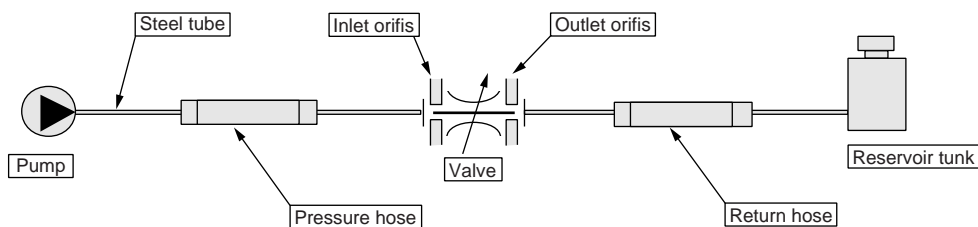


図7 配管のモデル  
Hose model

$$U_{TL} = U_{TU} \quad (6)$$

$$P_T = \{ U_R - U_S + (P_R + P_S) / (C) - 32 (U_R - U_S) \Delta T / D^2 \} (C) / 2 \quad (7)$$

ただし,

$$U_R = \{ U_{CU} - \alpha (U_{CU} - U_{AL}) \} / \{ 1 + (U_{CU} - U_{AL}) \} \quad (8)$$

$$U_S = \{ U_{CL} - \alpha (U_{CL} - U_{BU}) \} / \{ 1 - (U_{CL} - U_{BU}) \} \quad (9)$$

$$P_R = P_c - (U_R - C) (P_c - P_A) \quad (10)$$

$$P_S = P_c + (U_S - C) (P_c - P_B) \quad (11)$$

$$= \Delta T / \Delta X \quad (12)$$

蒸気空洞の発生する時 ( $P_T > P_v$  の場合)

$$P_T = P_v \quad (13)$$

$$C^+ \text{ より } U_{TU} = C_3 - C_4 P_T \quad (14)$$

$$C^- \text{ より } U_{TL} = C_1 + C_2 P_T \quad (15)$$

ただし,

$$C_1 = U_S - P_S / (C) - 32 U_S \Delta T / D^2 \quad (16)$$

$$C_2 = 1 / (C) \quad (17)$$

$$C_3 = U_R + P_R / (C) - 32 U_R \Delta T / D^2 \quad (18)$$

$$C_4 = 1 / (C) \quad (19)$$

次に境界条件について考える。(図8)

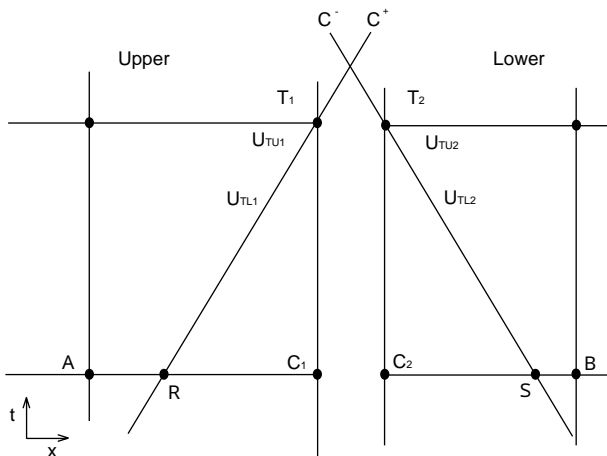


図8 管接続部の特性曲線

Characteristic curve of connected pipes

1) 上流端 ポンプより一定流量の油が供給される。ポンプ流量を  $Q_0$ 、上流端管断面積を  $A$  とする。

蒸気空洞の発生しない時 ( $P_T > P_v$  の場合)

$$U_{TU} = Q_0 / A \quad (20)$$

$$U_{TL} = U_{TU} \quad (21)$$

$$C^- \text{ より } P_T = (U_{TL} - C_1) / C_2 \quad (22)$$

蒸気空洞の発生する時 ( $P_T < P_v$  の場合)

$$U_{TU} = Q_0 / A \quad (23)$$

$$P_T = P_v \quad (24)$$

$$C^- \text{ より } U_{TL} = C_1 + C_2 P_T \quad (25)$$

2) 下流端 圧力一定のリザーバタンクに繋がる。一定圧力を  $P_{0E}$  とする。

$$P_T = P_{0E} \quad (26)$$

$$U_{TU} = C_3 - C_4 P_T \quad (27)$$

$$U_{TL} = U_{TU} \quad (28)$$

3) バルブまたはオリフィスバルブはオリフィスとして扱う。

蒸気空洞の発生しない時 ( $P_{T1} > P_v$  かつ  $P_{T2} > P_v$  の場合)

イ)  $C_2 C_3 / C_4 + C_1 > 0$  (正流) の時

$$U_{TU1} = ( - C_5 (C_2 / C_4 + A_1 / A_2) + (C_5^2 (C_2 / C_4 + A_1 / A_2)^2 + 4 C_5 (C_2 C_3 / C_4 + C_1))^{0.5} ) / 2$$

ロ)  $C_2 C_3 / C_4 + C_1 < 0$  (逆流) の時

$$U_{TU1} = ( + C_5 (C_2 / C_4 + A_1 / A_2) - (C_5^2 (C_2 / C_4 + A_1 / A_2)^2 - 4 C_5 (C_2 C_3 / C_4 + C_1))^{0.5} ) / 2 \quad (30)$$

$$U_{TL1} = U_{TU1} \quad (31)$$

$$P_{T1} = (C_3 - U_{TU1}) / C_4 \quad (32)$$

$$P_{T2} = (U_{TU1} A_1 / A_2 - C_1) / C_2 \quad (33)$$

$$U_{TL2} = U_{TU1} A_1 / A_2 \quad (34)$$

$$U_{TU2} = U_{TL2} \quad (35)$$

ただし、添え字 1 は上流側 2 は下流側を示す。

$$C_5 = ( U_{01}^2 / \Delta P_0 / C_2$$

: 無次元バルブ開口面積

(バルブは時間  $T$  の関数。オリフィスは時間  $T$  について一定)

$U_{01}$ : バルブ全開口時の管 1 の流速

$\Delta P_0$ : バルブ全開口時の圧力差

$A_1$ : 管 1 の面積

$A_2$ : 管 2 の面積

蒸気空洞の発生する時 ( $P_{T2} < P_v < P_{T1}$  の場合 (正流))

$$P_{T2} = P_v \quad (37)$$

$$U_{TU1} = C_6 ( - 1 + (1 - 4 (C_4 P_v - C_3) / C_6 )^{0.5} ) / 2 \quad (38)$$

$$U_{TL1} = U_{TU1} \quad (39)$$

$$P_{T1} = (C_3 - U_{TU1}) / C_4 \quad (40)$$

$$U_{TU2} = U_{TL1} A_1 / A_2 \quad (41)$$

$$U_{TL2} = C_1 + C_2 P_v \quad (42)$$

$$\text{ただし, } C_6 = C_2 C_5 / C_4 \quad (43)$$

蒸気空洞の発生する時 ( $P_{T1} < P_v < P_{T2}$  の場合 (逆流))

$$P_{T1} = P_v \quad (44)$$

$$U_{TL2} = C_7 (1 - (1 - 4 (C_2 P_v + C_1) / C_7 )^{0.5}) / 2 \quad (45)$$

$$U_{TU2} = U_{TL2} \quad (46)$$

$$P_{T2} = -(C_1 - U_{TL2}) / C_2 \quad (47)$$

$$U_{TL1} = U_{TU2} A_2 / A_1 \quad (48)$$



$$U_{TU1} = C_3 - C_4 P_V \quad (49)$$

$$\text{ただし, } C_7 = (A_1 / A_2) C_5 \quad (50)$$

蒸気空洞の発生する時 ( $P_{T1} > P_V$  かつ  $P_{T2} > P_V$  の場合)

$$P_{T1} = P_V \quad (51)$$

$$P_{T2} = P_V \quad (52)$$

$$C^- \text{ より } U_{TL2} = C_1 + C_2 P_T \quad (53)$$

$$C^+ \text{ より } U_{TU1} = C_3 - C_4 P_V \quad (54)$$

$$U_{TL1} = 0 \quad (55)$$

$$U_{TU2} = 0 \quad (56)$$

蒸気空洞の発生しない時 ( $P_T > P_V$  の場合)

$$P_T = (-C_1 A_2 + C_3 A_1) / (C_2 A_2 + C_4 A_1) \quad (58)$$

$$C^- \text{ より } U_{TL2} = C_1 + C_2 P_T \quad (59)$$

$$C^+ \text{ より } U_{TU1} = C_3 - C_4 P_T \quad (60)$$

$$U_{TU2} = U_{TL2} \quad (61)$$

$$U_{TL1} = U_{TU1} \quad (62)$$

蒸気空洞の発生する時 ( $P_T < P_V$  の場合)

$$P_T = P_V \quad (63)$$

$$C^+ \text{ より } U_{TU1} = C_3 - C_4 P_T \quad (64)$$

$$C^- \text{ より } U_{TL2} = C_1 + C_2 P_T \quad (65)$$

$$U_{TU2} = 0 \quad (66)$$

$$U_{TL1} = 0 \quad (67)$$

4) 管直列結合部 流量および圧力が同じとする.

$$P_{T1} = P_{T2} = P_T \quad (57)$$

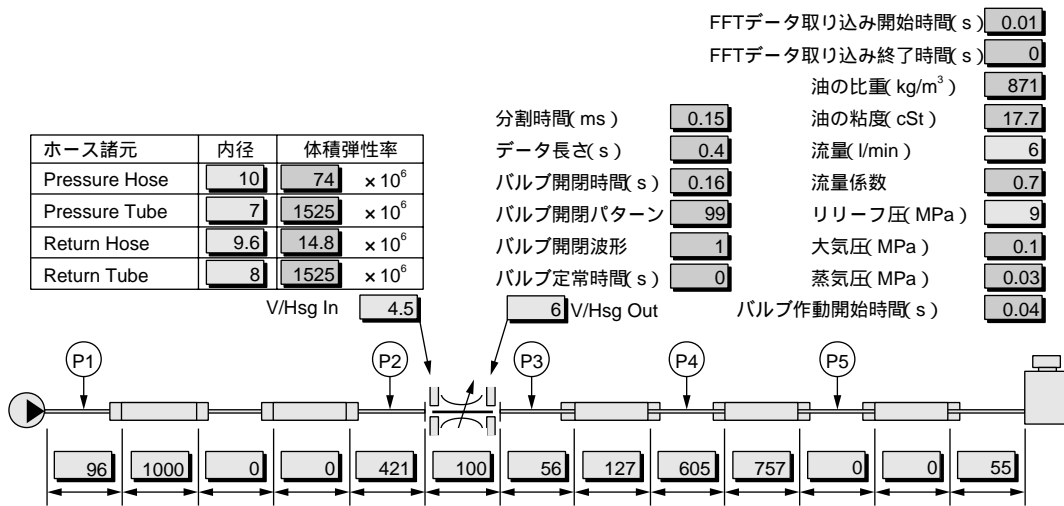


図9 シミュレーション条件入力画面

Input screen of simulation conditions

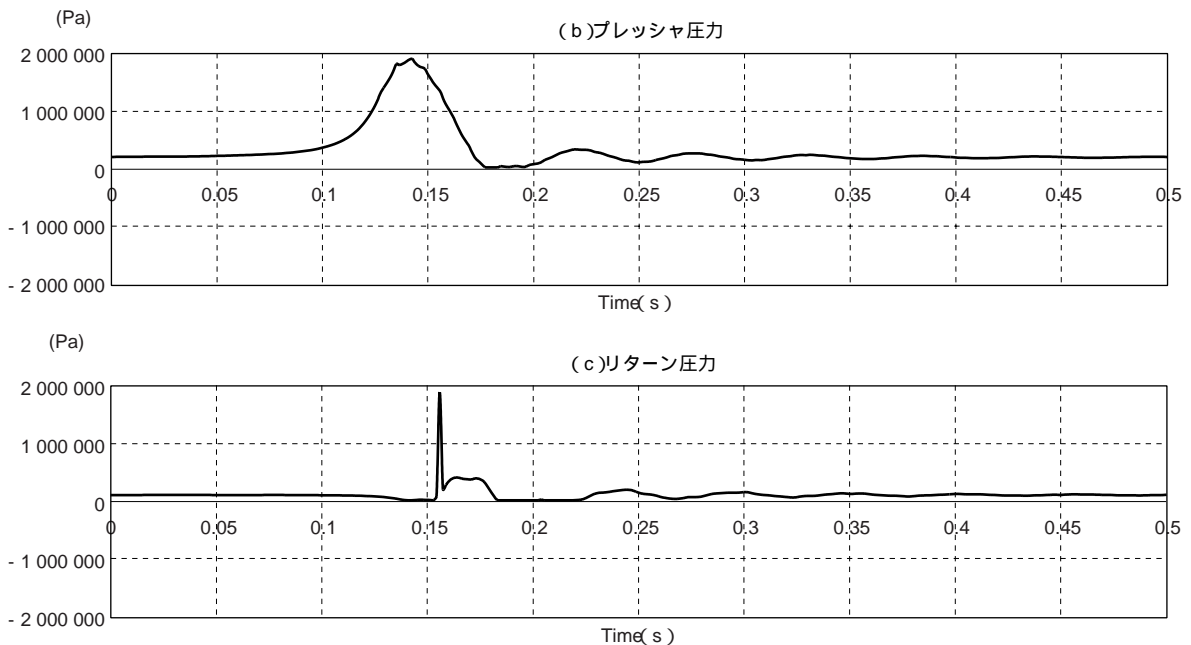


図10 シミュレーション結果

Simulation results

## 5. 実験検証

### 5.1 条件設定

圧力の伝播速度  $c$  はシミュレーションの結果に大きく影響を与えるため実験的に求めた。さらに、各種ホースへの展開を可能とするため、体積弾性率としてまとめることにより、ホース特性(膨張量)との関係も明確になった。

結果検証の題材として、実験車の諸元を設定した。その他、シミュレーションに必要な数値、条件等、シミュレーションの入力画面とあわせて図9に示す。

### 5.2 実測結果とシミュレーション結果の比較

先の実車試験での圧力計測位置に相当するP2, P3位置でのシミュレーション結果を図10に示す。

先の実測結果図2(b), 図2(c)と比較すると、波形は良くシミュレーションできた。

## 6. シミュレーションでの寄与度の分析

本シミュレーションを用い、図9の諸元で発生するサージ圧を100として、各要素の影響を調べると図11の結果を得た。この結果は従来の経験的な対策とも良く一致する。したがって本シミュレーションはハンマリング音のサージ圧を予測することができると言える。

バルブ出口に近い部分にゴム管がないとサージ圧が大きい

リターン配管が長いとサージ圧が大きい

リターン配管径が大きいほどサージ圧は小さい

プレッシャ配管のゴム部が短い方がサージ圧は小さい

ポンプ流量が小さいほどサージ圧は小さい

リリース圧の影響はほとんど受けない。

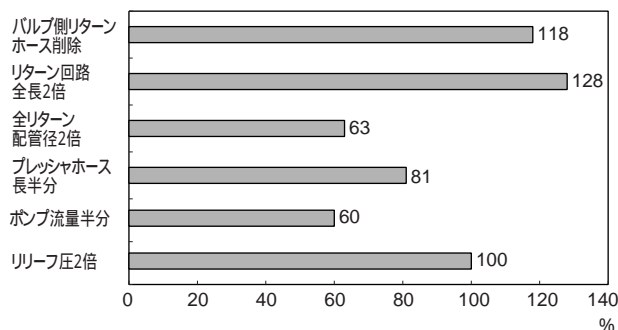


図11 サージ圧に対する寄与度

Contribution to surge pressure

## 7. まとめ

ハンマリング音のような負圧空間を取り扱う計算は難しいとされていたが、蒸気空洞モデルを適用することで、精度の良いシミュレーションプログラムを作成することができた。

ハンマリング音の発生原因がリターンサージ圧に起因することを明確にし、これまで、経験的に用いられてきた対策の説明を明らかにすることができた。

今後、設計段階での机上検討用ツールとして活用するとともに、当社製品のガイドラインの作成に結び付けていく。

## 参考文献

- 1) 大嶋昭男, 小林正典, 前田克司: Koyo Engineering Journal, no. 153(1998)20.
- 2) E. Benjamin Wylie: ターボ機械, vol. 11, no. 12(1982), vol. 12, no. 1(1984).
- 3) 山本他: 日本機械学会論文集(B編), vol. 55, no. 513(1989).
- 4) (社)日本油空圧学会編: 油空圧便覧第1編基礎編, オーム社.
- 5) V. L. Streeter, E. B. Wylie: 流体過渡現象, 日本工業新聞社(1973).

## 筆者



小林正典\*



大嶋昭男\*\*

M. KOBAYASHI A. OHSHIMA

\* ステアリング事業本部 ステアリング技術センター  
ステアリング実験部

\*\* 軸受事業本部 軸受技術センター 技術管理部