アンチロックブレーキシステムの液柱分離現象に関する研究*

(第 1 報, 気柱の発生状態と開弁時間の影響)

荻 野 弘 彦^{*1}

Research on Fluid Column Separation of Anti-Lock Braking System (1st Report, Observation of Fluid Column Separation and Research on Influence of Opening Time of Control Valve)

Hirohiko OGINO^{*2}

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tokai University,
1117 Kitakaname, Hiratsuka shi, Kanagawa, 259 1292 Japan

The fluid column separation occurring in the pressure control line of Anti lock Braking System (ABS) of vehicles was analyzed experimentally. As the experimental setup, the ABS for passenger cars installed on the test stand was used. The pressure fluctuation was measured with a pressure sensor installed on the pressure control line. The tube of the connection part of the ABS hydraulic unit and the pressure control line was changed to a transparent pipe, and the vapor column was observed. The fluid column separation occurred when the pressure control valve in the hydraulic unit was operated to increase braking pressure. The mechanism of occurrence of fluid column separation in ABS system and the influence that the time of opening the pressure control valve exerted on pressure fluctuation were analyzed in this paper.

Key Words: Anti-Lock Braking System, ABS, Fluid Column Separation, Flow Visualization

1. 結 論

近年, 自動車の安全性に関する意識が非常に高くなっており, さまざまな安全装置が開発, 装備されるようになってきた。このような安全装置の中でほぼすべての自動車に搭載されているのがアンチロックブレーキシステム (以下ABS) である。ABSはタイヤのスリップ状況を検知して, ブレーキ液圧を制御し, 濡れていたり凍結した路面での車両安定性と制御性を確保する装置である。

ABS液圧ユニット内にはブレーキ液圧制御のための減圧および増圧装置が設けられているが, 増圧装置が作動したときにブレーキ液圧が大気圧以下に減圧し, その直後に大きなレベルの圧力変動が発生する場合がある。これは増圧装置に用いられる圧力制御用電磁弁部に液柱分離現象が発生していることを示しており, この現象のためにABS作動時の騒音が大きくなり, また, ABS開発時には精度良くシステムの性能予測を行うことが困難になっているのが現状である。

液柱分離現象に関しては従来多くの研究がなされてきたが^{(1)~(6)}, 制御弁の開閉により発生する液柱分離を

対象とした解析が広く行われている^{(9)~(14)}。例えば, 小嶋らは高圧プレスのプレフィル配管系に発生する液柱分離現象を対象とし, 特性曲線法を使用した再結合圧力の計算方法を提案しており^{(15)~(17)}, 筆者らは自動車内圧力制御システムに発生する液柱分離現象を対象として, 再結合圧力の予測と配管系に挿入された弾性管による低減効果について調べている⁽¹⁸⁾。これらの研究は作動油が定常的に流動する配管系を対象に, 主として液柱分離の発生限界と液柱再結合時ピーク圧力を精度良く予測することを主題として, 気柱の発生メカニズムと成長のモデル化について論じている。これらの研究から, 気柱発生時のガス量を正確に見積もることができ, 成長時の気泡状態と拡散の影響が明確であり, かつ, 気柱長さが短い場合には気柱発生直後の再結合時ピーク圧力レベルが予測できることが知られている。しかし, ABSは定常的な流動のない末端の閉鎖された配管系であり, このような配管系を対象とした液柱分離現象に関する研究は筆者の知る限りない。また, ABS増圧系で発生する液柱分離は数回にわたって分離, 再結合を繰り返すため, 従来の解析手法では精度良く予測することができない⁽¹⁵⁾。

本研究はABSブレーキ配管系における液柱分離現象をモデル化し, ABS作動時のブレーキ液圧の変化を精

* 原稿受付 2003 年 4 月 7 日。

^{*1} 正員, 東海大学工学部 (〒259-1292 平塚市北金目 1117)。

E-mail: dola23@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

度良く予測できる解析手法を確立することを目的としている。そこで、まず、本報では台上に設けた実車ブレーキ配管系を使用して、圧力変動の測定と気柱部の可視化を行い、液柱分離現象をモデル化するために必要な気柱の発生状態の明確化と開弁時間が液柱分離と圧力変動に与える影響を明らかにした。

2. 実験装置および方法

2.1 ABS 液圧ユニットの構成と働き

ABS 液圧ユニットはブレーキペダルが取り付けられ、制動液圧発生部であるマスターシリンダ (以下M/C) と、各輪に取り付けられ、制動液圧を受けて制動力を発生するホイールシリンダ (以下W/C) の間に設けられる。M/C とABS液圧ユニット間は鋼管 (ブレーキチューブ) で接続され、ABS液圧ユニットとW/Cの間はブレーキチューブと弾性管 (ブレーキホース) により接続される。図1に使用したABS液圧ユニットの液圧回路構成を示す。前2輪用の2系統と後2輪を一括して制御する1系統で構成されている。実験では前輪1系等のみを使用し、他は液圧ユニット出口に栓をして閉鎖している。

液圧回路は電磁弁、ピストンポンプ、絞り、逆止弁等で構成されている。IN弁とOUT弁はポペット型の電磁弁で内部に設置されたばねによりIN弁は常開弁、OUT弁は常閉弁となっている。ポンプにはピストンポンプが使用されており、吸入側がW/C配管系、吐出側がM/C配管系に接続されている。

図2にIN弁絞り部の構成を示す。液柱分離が発生するIN弁はソレノイドで駆動される直径φ

1.5mmのニードルと内径φ0.7mmの弁座で構成される。ニードル先端は球形になっている。絞り部出口はリング状の室に接続され、さらに10mm下流にフレア管継手が設けられ、W/C配管系に接続されている。ニードルのストロークは0.3mmである。

以下、ABS作動時の各要素の働きを説明する。ABS液圧ユニットの働きはタイヤがスリップしたときにW/C圧力を減少して制動力を弱め、スリップ状態が緩和されたときにW/C圧力を増加させて制動力を強くすることである。したがって、液圧ユニット内には減圧装置と増圧装置が設けられている。OUT弁、ピストンポンプが減圧装置、IN弁部分が増圧装置を構成している。

図1はABSの作動していない通常制動時を示している。通常制動時にはM/C圧力はIN弁を通してW/Cに伝達される。減圧を行う場合はIN弁を閉鎖し、OUT弁を開放することによりW/Cとピストンポンプ吸い込み側を連通させる。W/C圧力を増圧させる時には再びIN弁を開き、OUT弁を閉じることにより行う。この時、W/C圧力の上昇勾配を制御するために、IN弁を間欠的に開閉し徐々に昇圧することが行われる。このような増圧の仕方を緩増圧と呼ぶ。緩増圧ではIN弁を開く時間を制御することで昇圧勾配を決めることができるが、このときに液柱分離が発生する。そこで、実験では緩増圧状態におけるW/C配管内の流動状態の可視化とW/C圧力の変化を測定した。

2.2 台上実験装置の構成

図3に実験装置の構成を示す。普通乗用車に用いられるブレーキ配管系を台上に設置し、実験を行った。実車には前後左右4輪分の配管系があるが、実験では配管1系統のみ設置した。

作動液には一般の車両に用いられるグレード

Fig. 1 Hydraulic circuit of ABS unit.

Fig. 2 Orifice part of IN valve.

DOT3の非鉱物油系ブレーキ液を使用した。液温 20℃における新油ブレーキ液の体積弾性係数は $K=1650\text{MPa}$ 、動粘度 $\nu=0.185\text{cm}^2/\text{s}$ 、密度 $\rho=1.04 \times 10^{-3}\text{kg}/\text{cm}^3$ で剛管内の音速が $c=40.2\text{m}/\text{s}$ となる。

M/C で発生した制動液圧は内径 $\phi 3.36\text{mm}$ のブレーキチューブを伝播し、ABS 液圧ユニットを経由してブレーキチューブと内径 $\phi 3.1\text{mm}$ のブレーキホースを通して W/C に伝わる。ブレーキホースはゴムとポリエステル繊維の多層構造となっており、静的なばね定数は $k=1.64 \times 10^5\text{N}/\text{cm}$ である。以下 ABS 液圧ユニット上流側のブレーキチューブを M/C 配管、下流側のブレーキチューブとブレーキホースを W/C 配管と呼ぶ。

制動液圧は M/C に取り付けられたブレーキペダルを空気圧で駆動するピストンで押圧することにより発生させた。M/C 圧力は ABS 液圧ユニットの上流 100mm の位置に設けたひずみ型圧力センサにより測定し、空気圧シリンダ内圧力を空気圧制御弁で調整することにより設定した。液柱分離発生時の圧力変動は ABS 液圧ユニット下流 100mm の位置に

設けた圧電型圧力センサにより測定した。圧力はサンプリングレート $10\mu\text{s}$ のレコーダに記録した。

可視化は気柱の発生状態を明確にするために行った。図 4 に可視化用液圧ユニットを示す。ABS 液圧ユニット直下の長さ 300mm の W/C 配管部分を透明アクリル製とし、高速度ビデオによる撮影を行った。高速度ビデオのシャッタースピードは $0.125\text{ms}/\text{コマ}$ ($8000\text{コマ}/\text{s}$) である。

2.3 実験方法 液柱分離は緩増圧時に発生するため間欠的に IN 弁を開閉させて実験を行った。以下、圧力変動を測定するための実験手順を説明する。

緩増圧開始時の条件として、W/C 圧力 0MPa 、M/C 圧力 12MPa とした。これらの圧力に設定するため、まず IN 弁を閉鎖し、W/C 配管と M/C 配管を分離した。次にブレーキペダルを押圧し、M/C 配管内の圧力を上昇させた。その後、IN 弁を開欠的に開閉して W/C 圧力を上昇させ、圧力変動の様子を測定した。可視化を行う場合も同様にして実験を行った。

IN 弁の開閉は発振器からのく形波信号をソレノイド駆動回路を介して与えることにより行った。図 3 に示したように IN 弁を開いている時間を開弁時間 T_o 、閉じている時間を閉弁時間 T_c と呼ぶ。本実験では閉弁時間 $T_c=60\text{ms}$ 一定とし、開弁時間 T_o の長さを変化させた。

まず、緩増圧時の圧力変動発生状態と、可視化結果について述べる。

3. 実験結果および考察

3.1 緩増圧時圧力変動と液柱分離の発生状態 以下に示す圧力変動の測定結果では 0MPa が大気圧を示しており、 0MPa 以下の圧力を負圧と呼

① ABS hydraulic unit ② Wheel cylinder(W/C) ③ Master cylinder(M/C) ④ Air cylinder ⑤ Function generator ⑥ ABS control circuit ⑦ Piezo pressure head ⑧ Strain pressure head ⑨ Brake hose (Inner diameter 3.1mm, Length 0.3m) ⑩ Wheel cylinder side brake tube (Inner diameter 3.36mm, Length 1m) ⑪ Master cylinder side brake tube (Inner diameter 3.36mm, Length 1m)

Fig. 3 Experimental setup.

Fig. 4 Flow visualization model.

Fig. 5 Pressure fluctuation in W/C line.

ぶことにする。

図5に緩増圧時のW/C圧力測定結果を示す。W/C配管内を大気圧状態とし、 $T_o=3\text{ms}$ 、 $T_c=60\text{ms}$ でIN弁を繰り返し開閉させることにより、徐々に圧力を上昇させている。図5を見るとIN弁の開閉に伴い、大きな圧力変動が発生している。特に開閉の初期に圧力が負圧に低下する部分が存在している。負圧状態が継続している部分で液柱分離が発生していると考えられる。

図6は $T_o=3\text{ms}$ の場合で第1回目の弁開閉時の圧力変動を拡大したものである。開弁直後にピーク圧力 P_1 が発生し、その後、負圧に低下して液柱分離が発生している。さらに、負圧が継続した後、ピーク圧力 P_2 が発生している。ここで大気圧以下の圧力が継続している時間を再結合時間 T_r と呼び、負圧に低下した時間を起点とした経過時間を Tr_1 とする。W/C圧力は P_2 発生後も負圧へ低下しており、液柱分離現象が繰り返されている。また、ピーク圧力レベルは低下しながら、圧力ピークが繰り返し生じており、ピークとピークの時間間隔が徐々に短くなっている。これはW/C配管内に残留する気泡が繰り返し圧力上昇にさらされることにより、容積が減少し、これに伴って音速が徐々に上昇するためと考えられる。

図7に $T_o=3\text{ms}$ の気柱発生状態の観察結果を示す。左端の部分がABS液圧ユニット出口になりIN弁の下流10mmとなる。 $Tr_1=0\text{ms}$ がW/C圧力が負圧に低下した状態を示している。負圧の発生とともに比較的大きな気泡と微細な気泡の混在する気柱がW/C方向へ流下し、停止した後に液圧ユニット側へ逆流するという現象が観察された。気柱はABS液圧ユニット出口が最も気泡密度が高く、先端部ほど密度が小さくなるが、最も気柱が大きく成長したとき、先端部は可視化モデル末端の

300mm付近まで延びており、圧電型圧力センサーの受圧面以上に気柱が成長していることを確認することができた。二回目以降の液柱分離も同様の気柱が発生し、W/C方向への順流と逆流を繰り返していた。

可視化結果より気柱の移動速度を求めると2～3m/sとなり、圧力波の伝播速度40.2m/sよりも非常に遅い。また、負圧継続時間 T_r と気柱の生成、消滅のタイミングが一致していることからピーク圧力 P_2 は気柱が消滅する時にW/C配管内をIN弁方向に逆流してきたブレーキ液がIN弁に衝突することにより発生していると考えられる。

この観察結果と圧力変動測定結果より液柱分離現象の発生、消滅過程は次のように予測される。IN弁が開くと高圧のM/C側ブレーキ液が大気圧で

Fig. 6 Pressure in W/C line. ($T_o=3\text{ms}$)

Fig. 7 State of gas column. ($T_o=3\text{ms}$)

Fig.8 State of gas column. ($T_o=5\text{ms}$) Fig.9 State of gas column. ($T_o=10\text{ms}$) Fig.10 Variation of surge pressure level and negative pressure time accompanied by change of T_o .

流動停止状態のW/C側配管へ流入する。この時、W/C配管内のブレーキ液が加速されるためにP1が発生する。図2に示すようにIN弁のストロークが小さいため、IN弁の閉鎖が始まると、絞り部でブレーキ液が強くせん断され、気泡を析出する。さらに、この気泡が核となり、負圧にさらされると気泡群で構成される気柱として成長しつつ、W/C配管内を流下すると考えられる。今後、絞り部分に圧力センサーを設け、IN弁の変移と絞り部における圧力の変化を測定することにより、この予測を検証したい。

図8に $T_o=5\text{ms}$ 、図9に $T_o=10\text{ms}$ の可視化結果を示す。気柱の構造、発生から消滅の仕方は $T_o=3\text{ms}$ の場合と同様であったが、 T_o が大きくなると気柱が短くなり、W/C方向への移動距離は短くなることが観察された。これは T_o が液柱分離の発生状態に影響を与えることを示している。そこで、 T_o は昇圧勾配を変化させる重要なパラメータであるため、 T_o の変化がP1, P2, Trにどのような影響を与える

のかを調べた。

3.2 開弁時間が圧力変動に与える影響

(1) T_o がP1に与える影響

図10に T_o がP1, P2, Trに与える影響を示す。図中の各測定点はそれぞれ6回の測定結果から求めたものである。 T_o を変化させても、ばらつきの程度はほぼ同じであることを確認した。実験を行った T_o の範囲ではP1は明確な変化傾向を示さず、ほぼ一定の値を示している。

図6においてIN弁を閉鎖する制御信号の立ち上がり時間 T_a と圧力変動が最大のP1を示す時間を比較すると、最も開弁時間の短い $T_o=3\text{ms}$ の場合でも、 T_a よりも早くピーク圧力P1が発生している。ここで、ピーク圧力P1への到達時間は配管内を伝播する圧力波の伝播速度から決まるので、配管長さが一定ならば到達時間は一定になる。このために T_o を変化させてもP1に影響を与えないことがわかった。

(2) Trに与える影響

可視化結果より圧力が負圧に低下している期間中は気柱が発生し、W/C方向への流動と逆流を行っている。従って、 T_o が長く、IN弁通過流量が大きい場合には、発生気泡量が多くなるとともにW/C方向への流動速度が大きくなって、Trも大きくなることが予想される。ところが、可視化結果によれば気柱は短くなり、また、図10に示したように、 T_o の増加に伴いTrは減少し、一定値に近づいていくことがわかった。これは T_o が大きくなって、IN弁を開いている時間が長くなると、IN弁上流側のM/C圧力がIN弁下流側に影響を与えるためと考えられる。

図11に $T_o=5\text{ms}$ 、図12に $T_o=10\text{ms}$ の場合のW/C圧力とM/C圧力の圧力変化を示す。M/C圧力はIN弁上流の停止していたブレーキ液がIN弁の開放に伴って流動を始めるために一度低下する。この波動はM/Cへ伝播、反射するために低下していたM/C圧力は上昇し、ピークを迎えた後に、低下、上昇を行い徐々に一定の圧力になっている。

図11の開弁直後のピーク圧力 P_1 が負圧に低下する部分に着目すると図6のように比較的滑らかに負圧へ接続せず、圧力低下勾配が変化している。さらに、開弁時間の大きい図12の場合、大気圧以下に減圧する前に圧力上昇が発生している。それぞれのM/C圧力の変化と比較すれば、図11の圧力低下勾配の変化は開弁時間が長くなったためにIN弁上流のM/C圧力の上昇がW/C側に影響を与えたためであり、また、図12の圧力上昇はIN弁が開いている時間が長いためにM/C圧力の上昇がIN弁を通過してW/C配管系に伝播したものであることがわかる。すなわち、 T_o が大きくなるとM/C側圧力変動の山部分がIN弁を通過してW/C圧力の山部分を作る時間も長くなるために負圧継続時間 T_r が徐々に短くなると考えられる。さらに T_o が大きくなると T_r が一定に近づくのは、 T_o が大きいほどIN弁を通過する流量が大きくなり、末端のW/C内圧力が大きくなるので、W/C方向へ流動した気柱が停止し、逆流を開始する時間が早くなるためと考えられる。

(3) P_2 に与える影響

P_2 は気柱を潰しつつW/C配管内を逆流してきたブレーキ液がIN弁に衝突することにより発生する。従って、衝突時にブレーキ液が持つ逆流流速の大きさにより P_2 の大きさは決まると考えられる。逆流流速はIN弁直下圧力とW/C圧力の差、および、ブレーキ液の逆流時間により決まる。すな

わち、圧力差が大きくなるほど逆流流速が大きくなり、また、 T_r が長いほど逆流加速時間が長くなるので最終到達逆流流速が大きくなり、 P_2 は大きくなると考えられる。

図10の場合、 $T_o < 6\text{ms}$ では T_r の短縮に対して P_2 も減少するのは逆流している時間が短くなるためと考えられる。一方、 $T_o > 6\text{ms}$ では T_r がほぼ一定であるにもかかわらず、 P_2 が増加しているのは T_o が大きくなりIN弁通過流量が増加するので、末端のW/C内圧力が上昇し、圧力差が大きくなったためと考えられる。このように T_r が一定であるにもかかわらず、 P_2 が上昇する現象はABSのような末端部が閉鎖された配管系の液柱分離に特有な現象と考えられる。

4. 結 論

ABS緩増圧時に発生する液柱分離現象を精度良くモデル化するために、台上に実車ABS配管系を設置し、可視化と圧力変動の測定を行った。この結果、以下のことがわかった。

- (1) IN弁の1回の開閉に対して複数回の液柱分離が発生している。気柱部は比較的大きな気泡と微細な気泡群で構成されている。
- (2) 以下のようなIN弁の開弁時間 T_o が液柱分離発生時の圧力変動に与える影響が明確になった。
  - ① W/C配管内を伝播する波動の速度が大きいために、波動が配管内を往復する時間が T_o よりも小さい。このために T_o はピーク圧力 P_1 に影響を与えない。
  - ② T_o が大きくなるとIN弁上流のM/C配管側の圧力波がIN弁を通過してW/C配管側へ伝播するため負圧継続時間 T_r が一定となる。
- (3) IN弁の開弁時間 T_o が大きくなるとW/C配管へ

Fig.11 Pressure in W/C line. ($T_o=5\text{ms}$)

Fig.12 Pressure in W/C line. ($T_o=10\text{ms}$)

流入するブレーキ流量が増大し、IN弁とW/C間の圧力差が大きくなるために、負圧継続時間 T_r が一定であるにもかかわらず再結合圧力 P_2 が上昇するという、末端が閉鎖された配管系に特有の現象が発生する。

本研究を行うにあたり多大なるご支援を頂いた株式会社日立ユニシアオートモティブに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 笠原, ほか1名, 機論, 34-264, 2部(1968), 1209-1216.
- 2) EB Wylie, J. Fluid Eng., Trans. ASME, 106(1984), 307-311.
- 3) 山本, ほか4名, 機論, 55-513, B(1989), 1296-1301.
- 4) 真田, ほか2名, 機論, 56-523, B(1990), 585-593.
- 5) Wen-Jei Yang, et. al, New Achievements in Fluid Power Engineering (93ICPF) (1993), 17-23.
- 6) 鷲尾, ほか2名, 平成5年春季油空圧講演会論文集(1993), 57-60.
- 7) 品田, ほか1名, 機論, 61-587, B(1995), 2579-2585.
- 8) 品田, ほか1名, 機論, 61-589, B(1995), 3260-3268.
- 9) 山口, ほか2名, 機論, 42-361, 2部(1976), 2818-2827.
- 10) 新井, ほか2名, 油圧と空気圧, 14-7, (1983), 513-519.
- 11) 山口, ほか1名, 機論, 51-462, B(1985), 536-544.
- 12) 品田, ほか1名, 機論, 54-508, B(1988), 3462-3470.
- 13) 鷲尾, ほか4名, 機論, 56-524, B(1990), 1011-1018.
- 14) 中川, ほか2名, 油圧と空気圧, 25-3, (1994), 425-432.
- 15) 小嶋, ほか2名, 機論, 50-451, B(1984), 680-689.
- 16) 品田, ほか1名, 機論, 53-487, B(1987), 971-979.
- 17) 品田, ほか1名, 機論, 58-550, B(1992), 1739-1746.
- 18) H. Ogino, et. al., Trans. of 2nd Symp. on Fluid Power (1993), 341-346.