

エアバッグ展開シミュレーションのガス流れの挙動に関する研究

井田 等^{*1}, 青木雅司^{*1}, 浅岡道久^{*1}, 大谷清信^{*2}

A Study of Gas Flow Behavior in Airbag Deployment Simulation

Hitoshi Ida^{*1}, Masashi Aoki^{*1}, Michihisa Asaoka^{*1}, Kiyonobu Ohtani^{*2}

要旨

エアバッグ展開シミュレーションは、開発・設計段階で乗員保護性能を予測する重要な手法として活用されている。エアバッグ展開挙動のキーとなる要素の1つはインフレーターから噴き出るガスの流れ挙動である。この研究ではガスの流れ挙動を把握するため、運転席エアバッグに使われるディスク型インフレーターの大気開放状態におけるガス流れをシュリーレン法を使って可視化実験を実施した。リテーナをつけたインフレーターからのガス流れは強い指向性を持つことがわかった。そして、そのガス流れ挙動を汎用解析ソフトLS-DYNAによるシミュレーションを試み、良い再現性を得ることができた。再現のためには、ガスが噴き出る方向とガスが拡散する角度のコーン角が重要であることがわかった。次に運転席エアバッグの展開挙動について、実験とシミュレーションを比較し、ガスの流れが展開挙動に及ぼす影響を分析した。

Abstract

Airbag deployment simulations have been utilized as an important technique to predict occupant protection performance in development and design stages. One of key elements of the airbag deployment behavior is gas flow behavior of jets from inflator. In this study, in order to understand the gas flow behavior of disk type inflator for driver side airbags, visualization experiments were conducted using the schlieren method. The gas flow from the inflator with a retainer has been found to have a strong directivity. Then, the gas flow simulations were conducted with a general purpose finite element program, LS-DYNA, it was possible to obtain good reproducibilities. For reproduction, it was found that jet direction and cone angle of gas diffusion were essential elements. Furthermore, comparison between simulations and experiments were conducted for deployment behavior of driver side airbags, the effect of the gas flow on deployment behavior was analyzed. It was found from the results that the reproduction of the gas flow from inflator was a major factor for reproduction on deployment behavior of driver side airbags.

1. はじめに

エアバッグ展開シミュレーションは、乗員保護性能の重要かつ効率的な評価技術の一つである。最初に開発された手法は、インフレーターから噴き出る混合ガスの出力特性と状態方程式によって得られた圧力をエアバッグ内側全体にかける均一圧法であった。この均一圧法は展開した状態のエアバッグのエネルギー吸収特性を評価することが可能で、主に機構解析と組み合わせて乗員拘束解析に用いられてきた。¹⁾

しかし均一圧法ではインフレーターから噴き出るガスの流れを考慮していないため、展開途中のエアバッグの挙動やエネルギー吸収を正確に求めることができないという問題があった。その問題を解決するための手法として、ガスの流れを考慮する流体-構造連成のALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法が導入されてきた。²⁾

このALE法をエアバッグ展開解析に適用した場合、折りたたまれたエアバッグの挙動を表現するには、膨大な計算資源とコストが必要であり実用性に問題があった。³⁾

その問題を克服するため汎用解析プログラムLS-DYNAでは、新たにエアバッグ内のガスの流れを粒子の運動に置き換えたCPM (Corpuscular Particle Method) が実装された。CPMではガス

*1 実験部 開発実験室

*2 東北大学 流体科学研究所

を連続体として扱わず、気体分子運動論に基づきながら、気体分子を全てモデル化するかわりに、全体の並進運動エネルギーが等価になるように一定数の粒子に置き換えている。^{4), 5)}

この機能ではALE法のように流体が存在する空間を離散化する必要がないため、利用可能な計算機資源と実用的な計算時間で展開シミュレーションをできるようになってきた。カーテンエアバッグのようにチューブ状に規制された流路をガスが流れる場合、実機の展開挙動とインパクトの荷重-変位特性をシミュレーションで評価できるため、エアバッグの製品開発に用いられている⁶⁾。しかし、運転席エアバッグのように比較的広い空間にガスが放出される場合は、展開挙動において実現象とシミュレーション結果に差異が生じる事があった。そこで我々は、エアバッグ内のガスの流れに注目し、インフレーターからのガス流れをシュリーレン法で可視化することを試みた。これまでの研究では、インフレーター内部のガスの流れを観察した事例はあったが、インフレーターから噴き出るガスの流れを可視化して、展開挙動との関連について言及されたことはほとんどなかった。⁷⁾

本稿ではインフレーターから噴き出るガス流れを可視化する実験を実施し、解析プログラムLS-DYNAのCPMでガスの流れを再現することを行った。そして、その検討結果を運転席エアバッグに適用し、展開挙動を再現することを試みた。

2. 方法

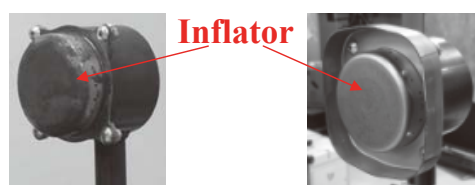
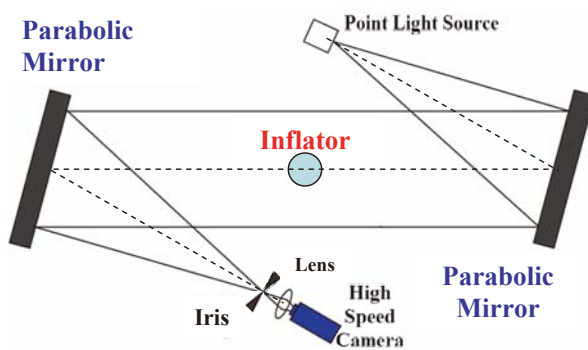
2-1. ガス流れの可視化実験

インフレーターから噴き出るガスの流れ挙動を把握するため、開かれた大気空間でシュリーレン法による可視化実験を行った。インフレーターから出るガスには二酸化炭素、窒素および水蒸気などが含まれるが、これらは無色の気体であるためガスの流れを明確に視認しにくい。インフレーターのガスの流れを観察する方法としては、従来、粉体などの微粒子をガスに混ぜてそのマーカー粒子の流れを観察するPIV (Particle Image Velocimetry) 法があった。⁸⁾

この方法では局所的な流速を計測することはできても、ガス全体は直接視認できないという課題があった。よって本研究では開放空間におけるインフレーターのガスの流れを直接観察するためにシュリーレン法を選択した。シュリーレン法とは光の屈折率の違いを利用して気体の流れを光学的に観測する方法であり、爆薬や航空機の衝撃波の可視化に用いられている。^{9), 10)}

今回の実験装置の構成を図-1に示す。点光源からの光を凹面鏡に反射させて平行光線をつくり、その中で被写体であるインフレーターからガスを噴出させる。その光線を再び凹面鏡により集光する。屈折率の違いにより焦点のずれた光を虹彩紋りにより除去することで、明暗の差として得られる映像を高速カメラで記録する。シュリーレン法では一般に焦点のずれた光をナイフエッジで除去するが、今回は虹彩紋りによって除去することで、インフレーター中心から拡散するガスをより鮮明にとらえるようにした。また、インフレーターガスの挙動をエアバッグ展開範囲と同等以上の範囲で撮影するため、平行光線を作る凹面鏡は直径1m、焦点距離8mという世界最大級のものをを用いた。この装置はトロンボーン演奏時に発生する3kPa程度の圧力変動さえ可視化できる解像度を持つ。¹¹⁾

この装置を用いて運転席エアバッグのインフレーターのガスの流れを、インフレーター単体の場合とインフレーターにリテーナを装着した場合の2条件で可視化を行い、ガスの流れを比較した。



Without retainer

With retainer



Parabolic Mirror

(Diameter: 1m, Focal Length: 8m)

図-1 シュリーレン法によるガス可視化装置
(東北大学流体科学研究所)

2-2. インフレータのガス流れシミュレーション

解析プログラム LS-DYNA の CPM を使い、可視化実験によって確認したインフレータからのガスの流れをリテーナの有無で再現することを試みた。

インフレータのガス温度とマスフローレートはタンク圧試験結果を再現するように同定した。

そして各種パラメータを組み合わせて検討することで、実機のガス流れを再現できるシミュレーション条件の検討を行った。検討した CPM のパラメータを表-1 に示す。

表-1 シミュレーション (CPM) パラメータ

No.	Parameter	Without retainer	With retainer
1	Initial direction of gas flow	Radial	Radial / Axial
2	Cone angle at orifices	Inactive / 16°/25°	Inactive / 0.1~25°
3	Friction factor	0 (default)	0 ~ -0.2
4	Dynamic scaling of particle	Inactive / Active	Inactive / Active
5	Initial gas inside airbag	CV method / Particle	CV method / Particle
6	Number of orifices	16	16 / 4
7	Treatment of gas components	Mixed / Multiple	Mixed / Multiple

2-3. 運転席エアバッグの展開実験

運転席エアバッグ展開実験を行い、インフレータおよびリテーナからのガスの流れがエアバッグ展開に及ぼす影響を確認した。その実験装置、展開挙動を図-2 に示す。

ガスの流れがエアバッグの展開に与える影響を確認するため、テザーのないエアバッグを折りたたまない状態で設置した。

また、エアバッグを固定する治具には荷重計を取付け、取付け点に生じるエアバッグ展開荷重を実験とシミュレーションで比較できるようにした。

2-4. 運転席エアバッグの展開シミュレーション

図-2 の運転席エアバッグの展開実験をシミュレーションにて再現し、実験との比較を行った。エアバッグ基布材料の機械的特性である引張特性とせん断特性は、それぞれ引張試験とピクチャーフレーム試験により求めた。

CPM のパラメータはインフレータのガス流れシミュレーションにおいて効果のあった値を使用し、開放空間におけるガスの流れを再現することがエアバッグの展開に与える効果を確認した。

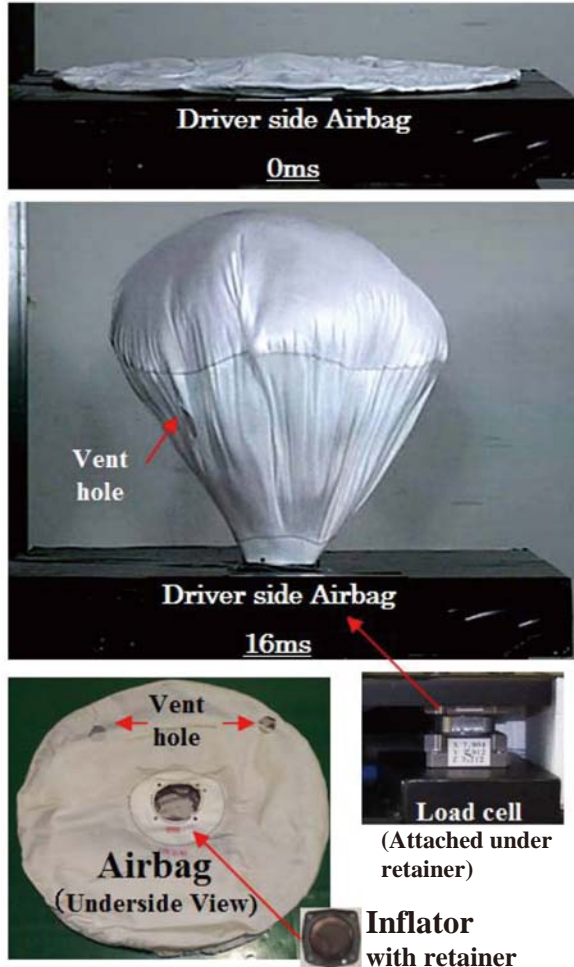


図-2 エアバッグ展開実験装置

3. 結果

3-1. ガス流れの可視化実験とシミュレーション

本実験にてガスの流れの様子が影となって明確に視認することができた。その結果を図-3 に示す。インフレータのガスは周囲の大気と比べ、高温、高圧であるため大きな屈折率の違いを生じ、図-3 のように暗い像として撮影され視認可能となった。

この可視化結果では、リテーナの有無によって流れに明確な差があることが観測された。リテーナがない場合は、インフレータの噴出孔に対して垂直にガスが出ていることが観察された。また、インフレータの噴出孔は円筒の側面に等間隔で配置されているので、インフレータの周囲から放射状にガスが噴き出して円盤状に拡散していくことが観測された。

一方、リテーナを装着するとリテーナの壁面に沿った流れに変化していることが観測された。さらにリテーナによって向きを変えたガスの流れはリテーナから出てもすぐに拡散しなかった(図-4)。

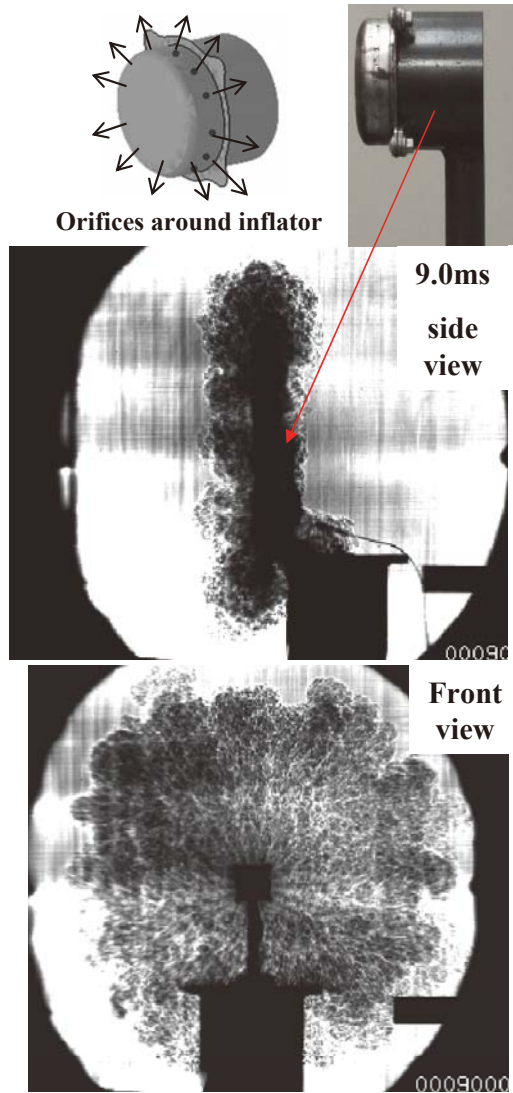


図-3 インフレーターガス可視化実験映像 (リテーナなし)

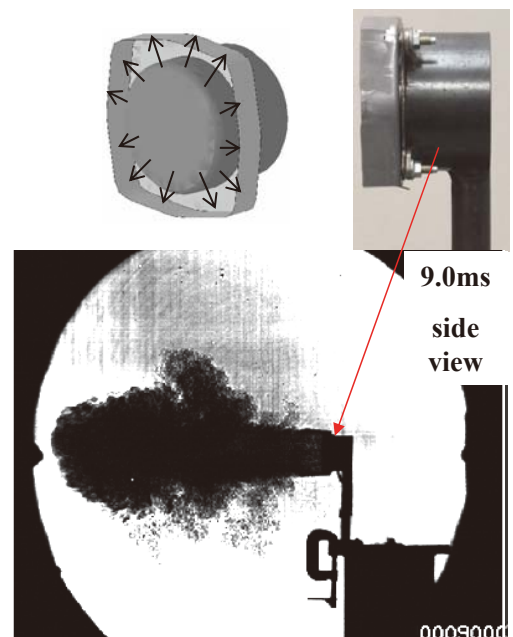


図-4 インフレーターガス可視化実験映像 (リテーナあり)

CPMによるシミュレーションで、表-1の各パラメータを検討し、実験相当のガス流れの挙動を再現する設定を見出した。

リテーナなしの条件では、インフレータの噴出孔にコーン角を設定することで、図-5のBに示すように、一定の方向と拡散角度を形成し、円盤状に拡散する傾向を再現することができた。

コーン角を設定しない場合、噴出孔から出たガスは一定の方向と拡散角度を形成せず、ランダムに拡散する傾向が見られた(図-5A)。

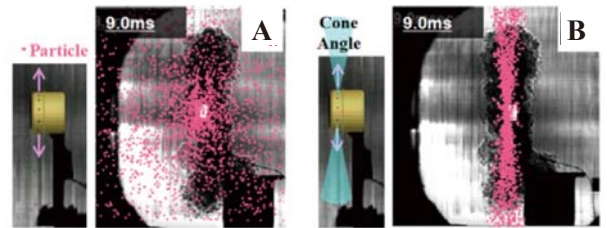


図-5 インフレーターガスシミュレーション結果 (リテーナなし)

リテーナを装着した条件では、ガスの噴き出し方向をインフレータの中心軸方向に設定し、さらにコーン角を設定することで、図-6のFに示すように実験相当の流れを再現することができた。

インフレーター噴出孔にラジアル方向の噴き出し設定をした場合、図-6のCのようにリテーナから出たガスはランダムに拡散した。

リテーナなしの条件で効果のあったコーン角を設定しても効果がなかった(図-6D)。

リテーナ壁面に衝突する粒子の反射角度を大きくする設定を行ったが、改善効果は見られなかった。

ガスの噴き出し方向をリテーナ壁面に沿って、インフレータの中心軸方向に設定したところ、図6-Eに示すように拡散範囲はわずかに狭まった。

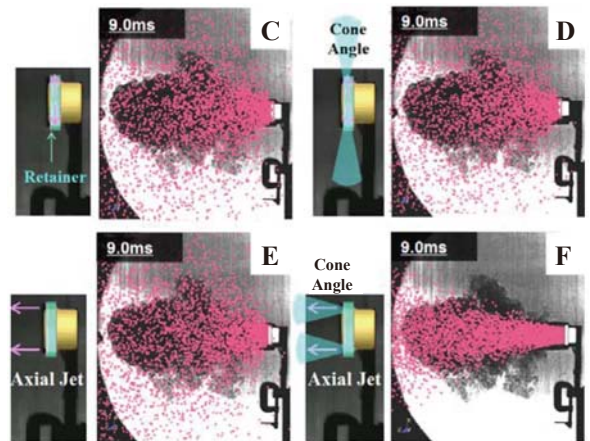


図-6 インフレーターガスシミュレーション結果 (リテーナあり)

表-1のパラメータのうち、No.3~7はほとんど影響がなかった。

3-2. 運転席エアバッグの展開実験とシミュレーション

運転席エアバッグ展開シミュレーションの再現性を実験との比較により評価した。

インフレーター噴出孔にラジアル方向の噴き出し設定をした図-6のCの設定と、ガス流れを再現した図-6のFの設定を運転席エアバッグ展開シミュレーションに適用した。その両者の結果と実験との比較を図-7に示す。

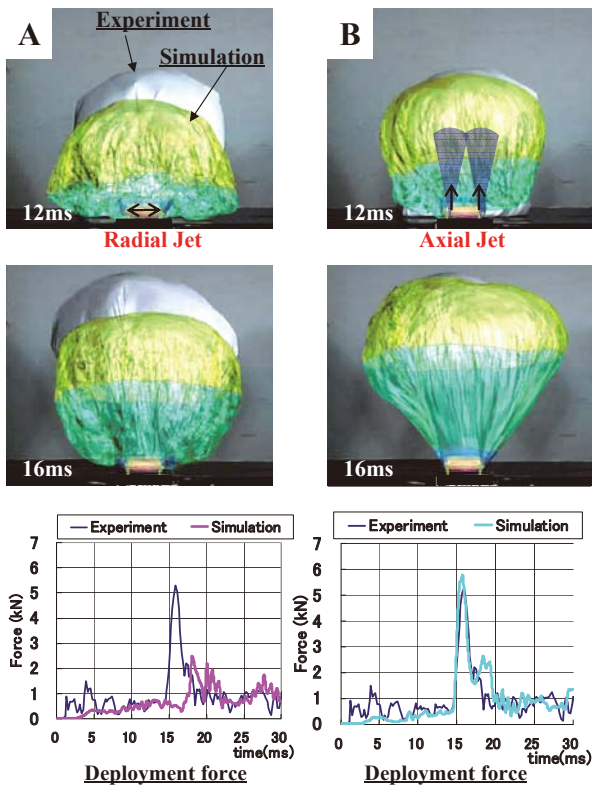


図-7 実験とシミュレーションのエアバッグ展開および展開荷重の比較
(左:ラジアル方向、右:垂直方向にコーン角設定)

インフレーター噴出孔にラジアル方向の噴き出しを設定した場合、図-7のAに示すように展開が実験に対して遅れ、取付け部への展開荷重が実機の半分程度しか発生しなかった。

一方、リテーナ壁面に沿ってインフレーターに対して垂直な噴き出し方向とコーン角を設定した場合、図-7のBに示すように、展開時間、展開荷重ともにほぼ実機を再現することができた。

4. 考察

実験とシミュレーションの比較結果によると、CPMでは粒子が比較的広い空間に出ると、各粒子のランダムな動きが支配的になり、ガス流れの挙動を十分に再現できなくなると考えられる。

実機でインフレーター内から噴出孔を通して出るガスは、噴出孔に対して垂直な方向に出る。これは、閉空間内の圧力は壁面に垂直な向きに生じるためと考える。

実機でリテーナを介してガスが噴き出する場合、リテーナとインフレーターを一つのガス発生源と考え、リテーナの開放面がガス噴出孔となり、噴出孔に対して垂直にガスが出ていると考えられる。

CPMでガスの流れを再現するには、ガスの噴き出し方向の設定と、ランダムに拡散することを抑制するコーン角の設定を併用する必要があると考えられる。

5. まとめ

インフレーターから噴き出るガスの流れの可視化実験、運転席エアバッグ展開実験およびそれぞれのシミュレーションを実施した結果、以下の知見を得た。

- ・リテーナがない状態でインフレーターから開放空間に噴き出るガスは、噴出孔より垂直に出る。
- ・インフレーターにリテーナが装着すると、リテーナの壁面に沿った流れが生じ、インフレーターの中心軸方向の流れとなる。
- ・インフレーターから開放空間に噴き出るガスの流れをCPMによるシミュレーションで再現するには、噴き出し位置にコーン角を設定する必要がある。
- ・リテーナを介した流れをCPMで再現する場合、インフレーターとリテーナを一つのガス発生源と考え、リテーナの開放面に垂直な噴き出し方向を設定し、コーン角を設定する必要がある。
- ・閉空間でのガス流れを再現した設定を運転席エアバッグの展開シミュレーションに適用することで、挙動と荷重特性がより実機に近づくことがわかった。

謝辞

本研究の可視化実験を行うにあたって、東北大学高山和喜名誉教授より貴重なご指導、ご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Wang, J. T., & Nefske, D. J. (1988). A new CAL3D airbag inflation model.SAE Technical Paper 880654.
- 2) Fokin, D., Lokhande, N., & Fredriksson, L. (2003) . On airbag simulation in LS-DYNA with the use of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian method. 4th European LS-DYNA Users Conference.
- 3) Zhang, N., Shi, L., & Tzeng, B. (2006). Issues on Gas-Fabric interaction in airbag simulation using LS-DYNA ALE.9th International LS-DYNA Conference.
- 4) Olovsson, L. (2007). *Corpuscular method for airbag deployment simulations in LS-DYNA* (Report R32S-1) .Huddinge, Sweden: Impetus AfeaAB.
- 5) Feng, B., & Coleman, D. (2008). Gas dynamics simulation of curtain airbag deployment through interior trims. 10th International LS-DYNA Conference.
- 6) Sugaya, H., Imura, K., & Mae, H. (2014). Development of Side Curtain Airbag Deployment Simulation Technology Using CPM. *Honda R&D Technical Review*, Vol.26, No.1.
- 7) Kratz, H., Pührer,C., Takazono, K., & Yano, K. (2008). Shockwave characterisation, parameter studies and visualization for a cold gas curtain inflator. *Airbag2008*.
- 8) Lee, J. S., Jang, G. Y., Kim, S., & Kim, S, C. (2006). Dynamic PIV measurement of a compressible flow issuing from an airbag inflator nozzle. *Journal of Thermal Science*, Vol.15, No.4, pp. 377-381.
- 9) Mizukaki, T., Miura, A., & Takayama, K. (2004). Experimental simulation of large-scale explosion using a micro-charge explosion (1) - Behavior of shock waves in a complicated closed-space -. *Science and Technology of Energetic Materials*, Vol.65, No.5, pp.180-188
- 10) Ukai, T., Ohtani, K., & Obayashi, S. (2015). Validation of measurement accuracy for near-field pressure around supersonic projectiles in a ballistic range. *Measurement, Journal of the International Measurement Confederation*, Vol.67, pp. 24-33.
- 11) Takayama, K., Ohtani, T., Ogawa, T., Kikuchi, T., Takayama, R.,&Takahashi, T. (2011). Visualization of weak shock waves emitted from trombone. *The Journal of the Acoustical Society of America 2011*. doi:10.1121/1.3588692

著者



井田 等



青木雅司



浅岡道久



大谷清信