

フューエルタンク燃料揺動音予測技術の研究

Study of Fuel Tank Sloshing Noise Prediction

若 生 徹*
Tohru WAKO

要 旨

フューエルタンク内の燃料が車両の加減速によって揺動するときに発生する騒音(燃料揺動音)を予測する技術の開発に、シミュレーションと実験的手法の両面から取り組んだ。まず、台上で燃料の入ったタンクに加減速Gを与えて揺動音を発生させる実験をおこない、音発生に相関の深い物理パラメータの抽出を試みた。次に動的陽解法による有限要素解析によりタンク内液面の挙動を再現し、実験の結果得られた物理パラメータが揺動音予測に有用であるかを検討した。

実験において揺動音発生は、燃料がタンク内壁を局所的に強く叩くことによって壁面が振動する現象であることがわかり、このときに発生するタンク内壁面の急激な圧力上昇を予測すれば、揺動音の発生を予測できることがわかった。コンピュータシミュレーションと実験を比較した結果、実験にて観察された急激な圧力上昇が、シミュレーションでも精度よく再現されていることがわかり、燃料揺動音の発生を予測することが可能になった。

ABSTRACT

The development of technology to predicting sloshing noise from a fuel tank was approached from the aspects of simulation and experiment. First, an acceleration and deceleration from a vehicle was applied to a bench-mounted fuel tank containing fuel to generate a sloshing noise, and the physical parameters that were closely correlated with the sloshing noise were extracted. Next, computer simulation using an explicit transient solution method was performed to reproduce the fluid motion behavior in the tank, and a study was performed whether or not the physical parameters obtained from the experiment was useful for predicting sloshing noise. As a result, it was confirmed that the sloshing noise was caused by fuel striking localized areas of the inside wall of the tank. It was found that the occurrence of sloshing noise could be predicted by analyzing the impulsive pressure rise at the inside wall of the tank. A comparison of the computer simulation results with the experimental results showed that the experimentally observed impulsive pressure rise could be accurately reproduced by simulation as well, thus enabling the occurrence of fuel sloshing noise to be predicted.

1. まえがき

乗用車において、車室内の静粛性を高めるためには、関連する全ての機能部品にて騒音低減の取り組みをおこなうことが重要であり、燃料タンクも例外ではない。そのため、燃料揺動音の低減に対する要求は年々高まりつつある。

従来の鋼板で作られた燃料タンクでは、揺動音を抑えるための仕切り板をスポット溶接で取り付け、実車評価による試行錯誤を経てその仕様を決定していた。しかし、仕切り板の取り付けが困難な樹脂製燃料タンクの採用が増えるにつれ、揺動音が発生しにくい基本形状を開発初期段階で考慮することが求められるようになった。さらに、コンピュータを活用した試作車削減、開発期間短縮の取り組みの中で、燃料揺動音の発生をコンピュータシミュレーションで予測

する技術へのニーズが高まっている。

揺動音を予測するためには、まずタンク内燃料の挙動をコンピュータで再現することが必要だが、現象が複雑なため、従来は非常に難しいとされていた。しかし近年の解析技術進化に伴い、自由表面を伴う流体の挙動を扱える市販の解析コードがいくつか見られるようになり、解析事例も報告されている^{(1), (2)}。これらの報告においては、シミュレーションでタンク内の流れを可視化することにより、揺動音の対策において大きな指針が得られることが述べられているが、シミュレーションによって音の発生を直接予測する技術についてはあまり言及されていない。これは、現象把握が不十分なため、タンク内での燃料の動きが、どのような過程を経て音発生に至るかというメカニズムが十分に解明されていないことによる。本研究においては、まず台上実験に

*栃木研究所

よって揺動音発生に相関の深い物理パラメータを抽出し、次にコンピュータシミュレーションでこの物理パラメータの再現を試み、両者の結果を比較することによって、揺動音発生をコンピュータシミュレーションで予測する技術を開発する。

2. 揺動音の発生メカニズム

揺動音発生メカニズムは以下の二つの仮定が考えられる。ひとつは燃料が攪拌されることによりタンク内の空気が振動して音が発生し、その音がタンク壁面を透過して外部に達するというものであり、もうひとつは燃料がタンク内壁を叩くことでタンク壁面が振動し、音を発生するというものである。この二つの現象はどちらか一方だけが単独で発生するわけではないが、より支配的な現象がどちらであるかを明らかにすることは、シミュレーションをおこなう上で非常に重要である。もし前者が支配的であれば、液体が攪拌されて周囲の空気を振動させる過程のシミュレーションが必要だが、気層と液層の相互作用による気層の振動を予測することは難しい。一方、後者が支配的であれば、タンク内の燃料がタンク壁面に当たるときの圧力上昇を計算することで、予測が可能である。

3. 台上実験

3.1. 実験装置

上記の二つの現象のうち、どちらの影響が大きいかを台上実験により解明する。Fig. 1 に実験装置の概念を示す。

タンクの内外の騒音レベルを比較するためにタンク上 300 mm の箇所と、タンク内部にそれぞれマイクロフォンを設置した。またタンク内側の 10 箇所にも圧力センサを取り付けてタンク内の燃料がタンク壁面に当たるときの圧力を測定し、同時にタンク外側には壁面の振動を測定するための加速度ピックアップを取り付けた。

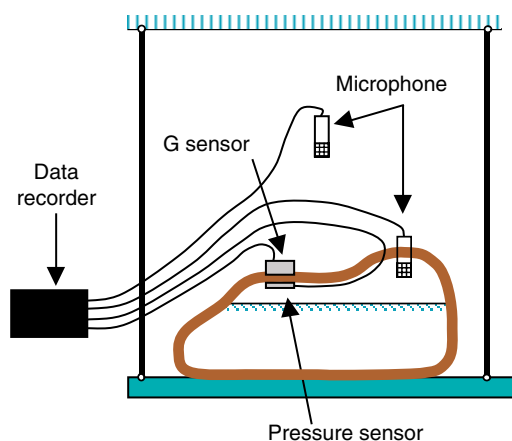


Fig. 1 Concept of equipment

タンクを揺動させるための実験装置としては、鉄パイプで作った枠をワイヤーで吊るし、ここにタンクを載せて前後に揺らす形式のものを作成した。Fig. 2 に装置の全体構造を示す。

タンクに加減速 G を与える手順は以下のようにした。まずタンクを Fig. 3 のストッパに当たるまで後方に引き静止し、中の液面が静止するまで待った後にタンクをリリースすると、タンクは加速しながら前方へ動き、下死点を越えてさらに前方に動く。タンクを支える枠には後方にロープが繋がっており枠のストロークを規制している。したがってある限界を超えてタンクが前方に動くとそのロープが突っ張ってタンクに減速 G を発生させる。そしてロープが伸びきるとタンクは後ろに下がり始める。ロープはあらかじめ最大減速加速度が $0.3G$ になるように長さが調整されているので、安定して毎回同じ減速 G を発生させることができる。



Fig. 2 Laboratory equipment

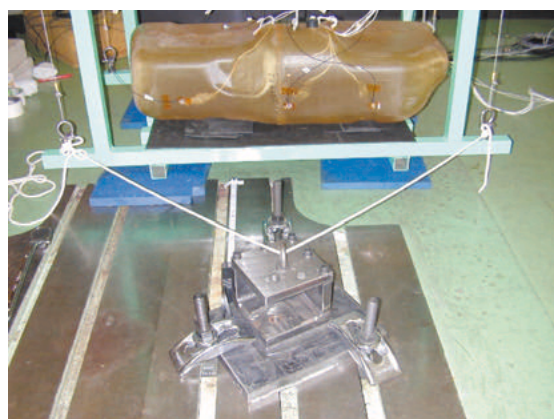


Fig. 3 Stopper

3.2. 実験結果

Fig. 4 に、タンク上 300 mm において測定した騒音(以下、評価点騒音と記す)のグラフを示す。このときのタンク内燃料の液量は 40 L である。グラフには、大きなピークが 5 回ほど現れているが、これは揺動した液面が、タンクの前壁に交互に達したタイミングで発生するものである。

その中のひとつのピークに着目して詳細な検討をおこなう。Fig. 5 は評価点騒音, Fig. 6 はタンク内騒音, Fig. 7 は評価点に最も近い箇所のタンク壁面振動を表したものであり, ピークが立ち上がる瞬間に着目し, 時間軸を拡大して表したものである。この三つのグラフにおいて横軸1目盛は

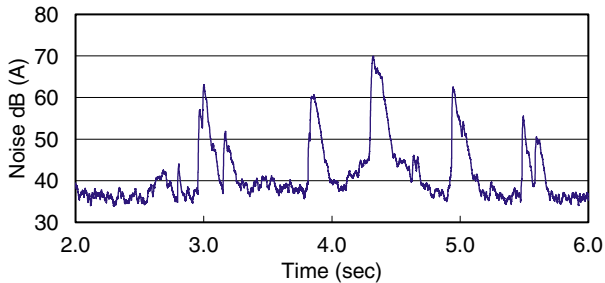


Fig. 4 Sloshing noise at evaluation point

0.05 秒である。これら3者を比較すると, 評価点騒音とタンク壁面振動には強い相関が見られるのに対し, タンク内騒音と他の2者との間には相関が見られないことがわかる。したがって, 燃料タンク内騒音が評価点騒音に及ぼす影響は小さいと考えられる。2章で記した二つの仮定のいずれの場合でも, 最終的にはタンク壁面が振動することで評価点に音が伝わるため, 壁面振動と評価点騒音に相関性があるのは当然であるが, タンク内騒音との相関が見られないことから, タンク壁面を振動させる原因は他にあると考えられる。

次に, タンク内壁の圧力と評価点騒音の関係に着目する。Fig. 8は, 評価点騒音とタンク各点の壁面圧力の時刻歴変化を比較したものである。この図において評価点騒音が立ち上がるのと同時に燃料タンク内壁圧力が急激に立ち上がる現象が見られる。このことから評価点騒音はタンク内の液

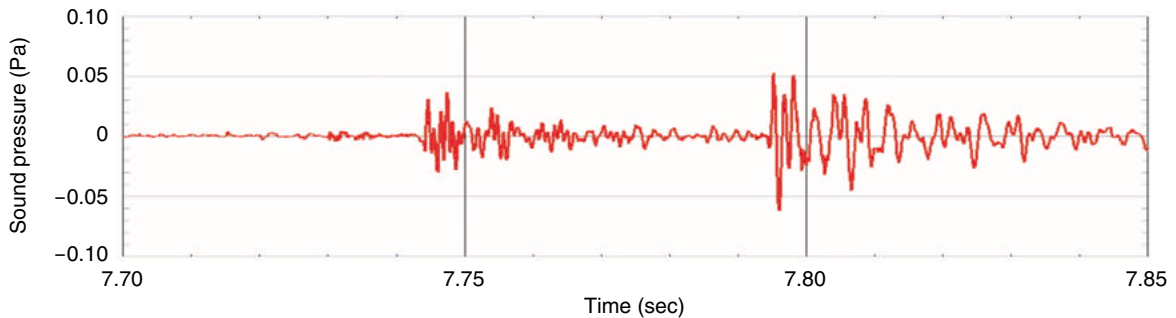


Fig. 5 Sound pressure (Outside of tank)

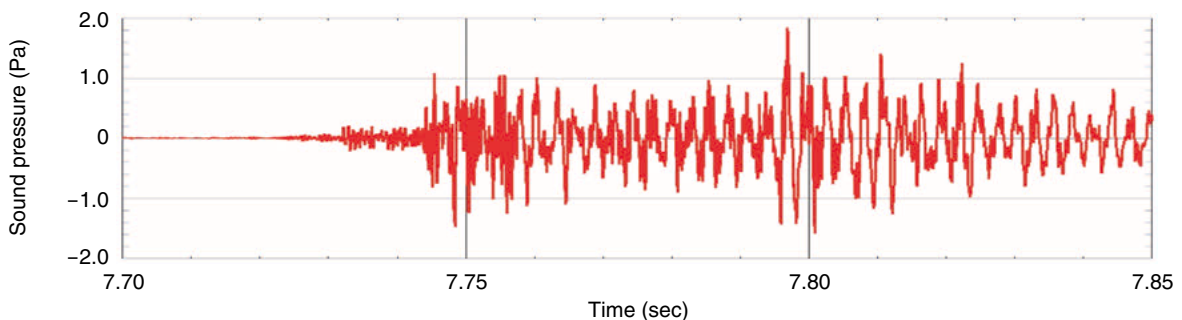


Fig. 6 Sound pressure (Inside of tank)

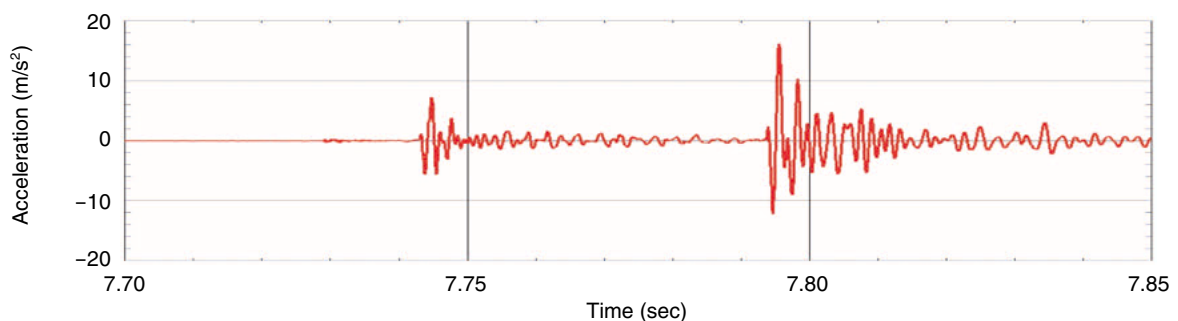


Fig. 7 Vibration (Tank surface)

体がタンク壁面にぶつかることによって、タンク壁面を振動させて発生すると推測できる。感知された圧力上昇が測定場所ごとに異なっているのは、液体がタンク壁面にぶつかる現象がきわめて局所的に発生していることを示す。

シミュレーションで液面の動きを可視化し、壁面の圧力上昇が見られる箇所を詳細に観察すると、燃料が壁面にぶつかる現象が起きている事が確認でき、このことを裏付けている。タンク内壁圧力がゆるやかに上昇しているときに

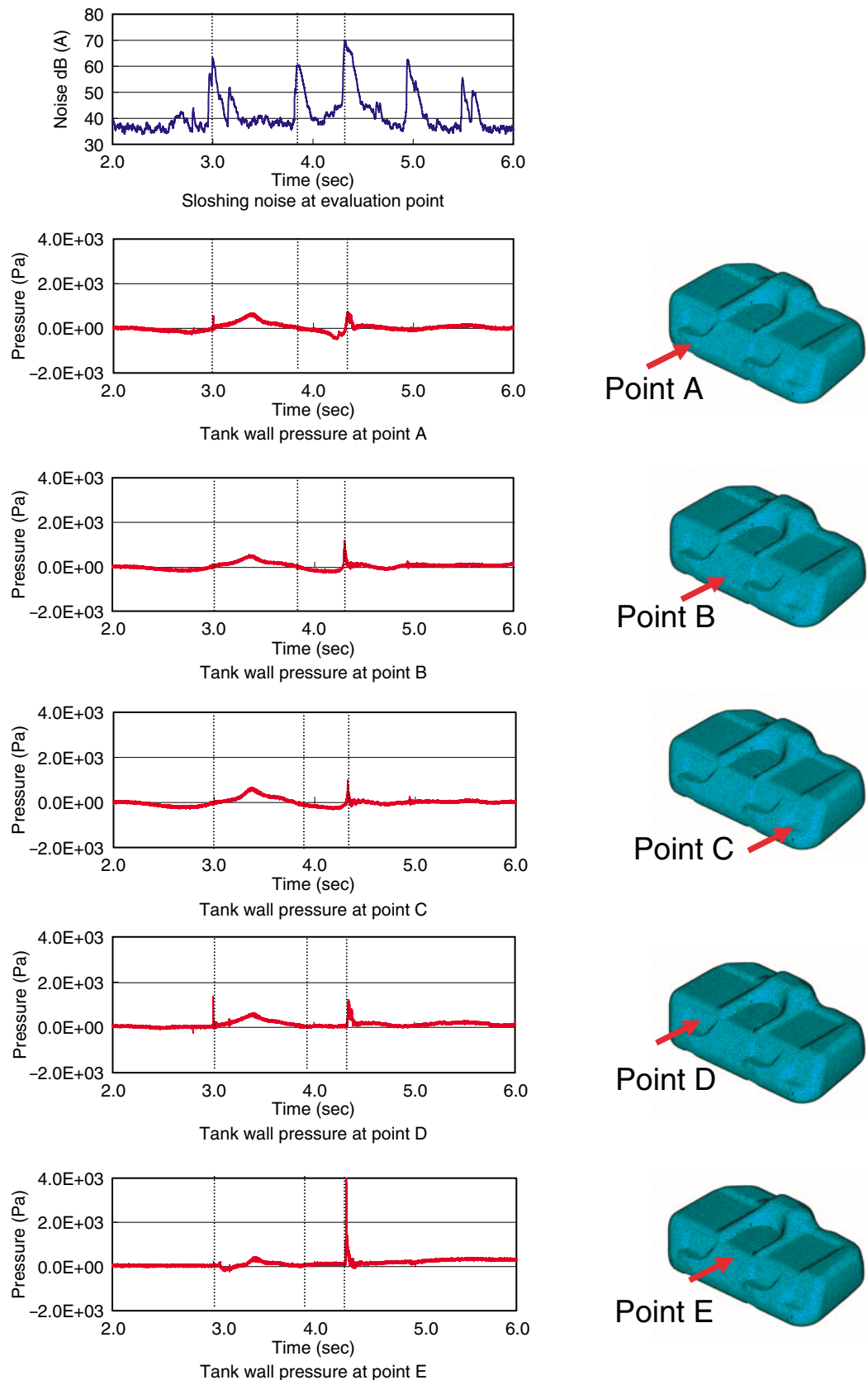


Fig. 8 Measured tank wall pressure

評価点騒音がそれに反応してピークを迎えるという現象は見られないので、揺動音は短時間で急激に圧力が上昇するときのみ発生すると考えてよい。ところで、評価点騒音の立ち上がりに対し、2番目ピークのように、圧力ピークがどの測定点においても観察されない場合がある。これは、圧力上昇が局所に発生するため、測定点以外の場所で圧力上昇が発生したためであると考えられる。

4. コンピュータシミュレーション

一般的に自動車の燃料タンクは、内容積の全てが燃料で満たされることはなく、タンク内には常に気層と液層が同時存在する。したがって燃料タンク揺動のシミュレーションをおこなうためには、自由表面を持つ流体の挙動を再現する必要がある。また、系のなかに構造(タンク)と流体(燃料)の両者が存在し、互いに影響を及ぼしているため、構造-流体連成解析が必要になる。本研究では、自由表面を有する流体を扱うことができ、かつ構造-流体連成解析が可能な MSC Dytran をシミュレーションに使用した。

4.1. モデル化

構造-流体連成解析においては、流体部分には Euler 要素を、構造部分には Lagrange 要素を用い、その両者を重ね合わせる手法を用いた。ここで Euler 要素とは要素が空間に固定され、対象物が要素の中を移動していくタイプの要素であり、流体の解析に適している。一方 Lagrange 要素は、対象物の変形移動に従い要素も変形移動するタイプの要素で、構造物の解析に適している。両者の連成には MSC Dytran の General coupling と呼ばれる方法を用いた。これは Euler 要素と Lagrange 要素をそれぞれ完全に独立して定義し、両者を重ね合わせるという手法である。Euler 要素から見ると Lagrange 要素は流体を仕切る壁として作用し、Lagrange 要素から見ると、流体からの反力が、この境界面を通して構造に伝わるという形で両者が連成する⁽³⁾。

Fig. 9 に、本研究で使用した有限要素モデルの一例を示す。この有限要素モデルに初期の液面高さを指定すると、タンクと初期液面に囲まれた領域に流体が定義され、流体との境界面であるタンクが移動するとその動きに連成して中

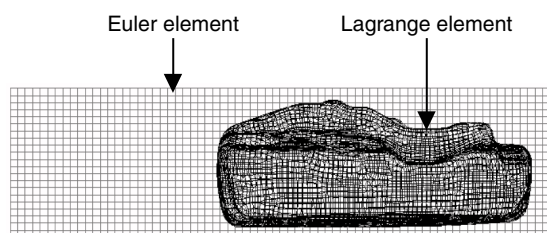


Fig. 9 Finite element model

の液体が動く様子を再現することができる。タンクの移動は、移動速度の時刻歴データとして与えることにより、任意の動きを再現することができる。

4.2. 再現性の確認

シミュレーションが実際の液面の動きを再現できることを確認するために、透明なアクリル樹脂で内部を可視化したタンクを作成し、液面の動きを比較した。その結果をFig. 10に示す。両者を比較すると、液面の動きがシミュレーションによって非常に良く再現されていることがわかる。

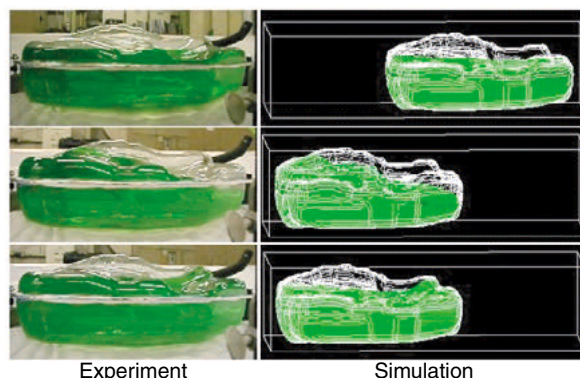


Fig. 10 Liquid surface behavior

5. 実験結果との比較

台上試験で観察されたタンク内壁の圧力ピークが、シミュレーションで観察されるかどうか、比較をおこなった。台上試験の状態を正確に再現するため、シミュレーションにおけるタンク速度は、台上試験で実測された値を入力値として使用した。そして台上試験において圧力センサを貼ったのと同じ箇所でのタンク内壁圧力を出力させ、台上試験の実測結果と比較をした。Fig. 11は、タンク壁面圧力時刻歴波形の実測値とシミュレーション結果を評価点騒音と比較したものである。Point Dでのシミュレーション結果は、実測結果とよく一致しており、台上試験で現れた鋭い圧力のピークがシミュレーションでも同様に観察されることがわかった。それだけではなく、Point Fのように、台上試験では測定点がなかったため観察されなかった箇所においても評価点騒音と対応した圧力ピークがシミュレーションにおいて観察され、仮定が正しかったことが証明された。シミュレーションにおいては、コンピュータの能力が許す範囲で実測よりもはるかに多くの測定点を設けることができる。したがって、測定点を適切に配置することによって、極めて局所的に発生する圧力ピークを漏れなく再現することができる。このことから、シミュレーションによって揺動音の発生を精度よく予測することが可能になった。

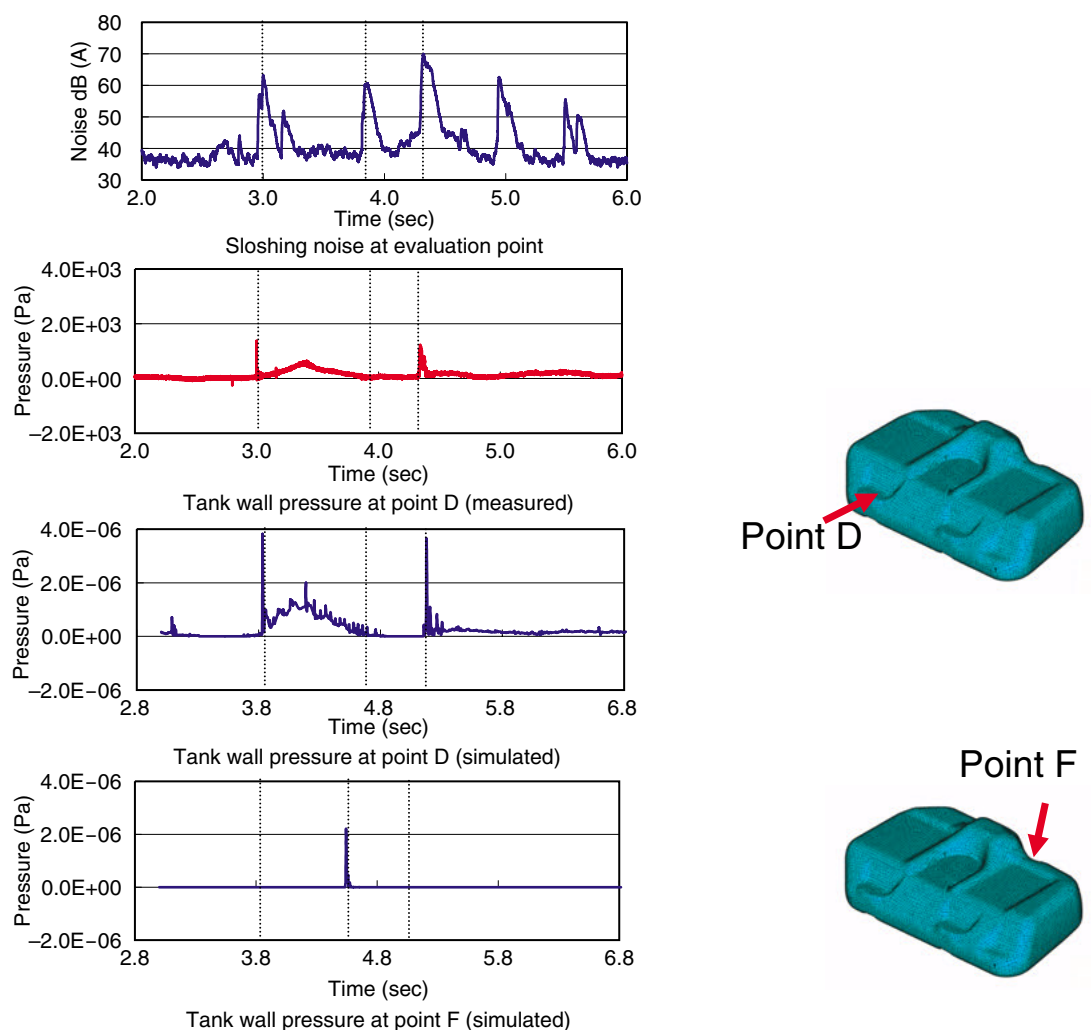


Fig. 11 Comparison between simulation and experiment

6. まとめ

参考文献

シミュレーションによる揺動音予測技術開発のために、揺動音発生に相関の深い物理パラメータを抽出する実験をおこない、結果をシミュレーションと比較することにより以下の知見を得た。

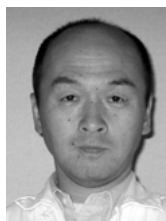
- (1) 揺動音は、タンク内の燃料が局所的にタンク内壁を打つことによって発生する。
- (2) このとき、タンク内壁において壁面の圧力が短時間で急激に立ち上がる現象が発生する。
- (3) シミュレーションにおいて、この鋭い圧力ピークを再現できたので、揺動音発生の予測が可能になった。

謝 辞

最後に本研究の推進にあたり多大なご協力をいただいた(株)エステックの関係者の皆様に、深く感謝の意を表します。

- (1) Kamiya, K., Yoshida, Y., deVries, E.: Simulation studies of sloshing in a Fuel Tank, SAE Paper 2002-01-0574
- (2) 神谷幸司, 鈴木健太郎: フューエルタンク内液流動の可視化とノイズの推定, MSC.Softwareソリューションフォーラム 2000 論文集
- (3) MSC. Dytran USER'S MANUAL Version4.7, MSC. Software, p.100-106(1999)

■著 者■



若 生 徹