

9

衝突時の燃料揺動評価技術の構築と開発への適用 Establishment of Fuel Sloshing Evaluation Technique Upon Crash and its Application to the Development

山内 一矢*1 嘉村 浩二*2 花田 裕*3
Kazuya Yamauchi Koji Yoshimura Yu Hanada
小島 宏介*4
Kosuke Kojima

要 約

マツダは「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」を両立したクルマをお客様に提供することを目指して商品開発に取り組んでいる。衝突安全性能は、CAE (Computer Aided Engineering, 計算機支援工学) を駆使して、安全性能と軽量化などを高次元で両立する車両構造を効率的に開発している。近年においては、マルチフィジックス (複数分野にまたがる物理現象) 領域への適用が拡大しており、燃料タンクの燃料揺動現象の解析技術を開発し、次世代商品群の開発に適用している。この解析技術は試作車両を用いての実機検証型の開発から事前検証型の開発へ革新し開発効率を向上させるのみでなく、開発の早い段階でのCAEプロセス実行による衝突時の燃料漏れ防止の構造と品質を造り込むことが実現できた。

Summary

It is our challenge to develop and provide vehicles that satisfy both “driving pleasure” and “outstanding environmental and safety performance” for all customers. By actively employing CAE (Computer Aided Engineering) techniques in our crash safety development, we efficiently develop body structures that simultaneously achieve safety performance and weight reduction. In recent years, CAE techniques are expanding their scope of applications to multiphysics fields, and we have newly developed an evaluation technique of fuel sloshing in fuel tanks, and applied it for our next-generation vehicle development. With this technique, we not only improved development efficiency by replacing the conventional prototype verification process with early-stage verification process, but also developed fuel-leakage prevention structure by implementing CAE process in the early-development stage.

1. はじめに

マツダは、リアルワールドにおける衝突事故 (日々発生している実際の衝突事故) を研究し衝突安全性能の進化に取り組んでいる。SKYACTIV-BODYに代表される車体開発は、あらゆる衝突形態をバーチャル検証することで、衝突過程の車両や乗員挙動を高精度に予測している。

燃料タンクの開発では、安全に給油できる性能、悪路走行を想定した振動耐久性能、そして万が一の衝突事故発生時の燃料漏れを未然に防ぐ火災防止性能など、燃料システムの健全性の確保が重要である。特に衝突時の燃料タンクは、車両の速度変化による燃料の揺動、タンク壁面

の膨張、燃料揺動抑制のバッフル板の変形、これによる燃料の動きの変化など、さまざまな現象を発生させる。これらの燃料とタンク構造の相互作用が、衝突時の燃料漏れ評価に影響する主要因となるため、理想の燃料タンク性能開発においては、燃料と構造体の複雑な挙動を予測した上で構造や仕様を評価し決定するマルチフィジックス解析技術が重要となる。本稿は、流体解析と構造解析を同時に行う流体構造連成解析技術の構築と次世代商品群の燃料タンク構造への適用について報告する。

*1, 3, 4 車両開発本部
Vehicle Development Div.

*2 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

2. 衝突時の燃料システムの気密性保持に向けた開発

衝突安全性能には、乗員保護性能や緊急脱出性能に加え、燃料システムの気密保持による火災防止性能がある。Fig. 1, 2に示した燃料システムを、Fig. 3に示すようなさまざまな衝突モードで保護し、衝突後も気密性を保持して火災を防止することが必要である。

衝突時の燃料漏れ防止のためには、燃料タンクと周辺にレイアウトされた部品の干渉によるタンクの穴あきや、パイプの挟まれ、タンク内部のロールオーバーバルブの破損、タンク内部のホースやパイプの抜けなどを発生させないように、仕様を決定する必要がある。そのためには、Fig. 4に示すように、車体を構成するフレームやクロスメンバーなどのユニットの強度やFig. 3に示したさまざまな衝突形態におけるユニットの圧潰するタイミング、順序、車体全体のエネルギー吸収量を精度良く見積もり、車両全体の挙動や、車体に固定される各ユニットの挙動、それらの変形の様相を設計段階で精度良く予測することが重要である。これらは構造体の変形や破壊のみを扱うため、メッシュサイズの詳細化、各ユニットの詳細な作り込み、過大入力による溶接点や部材の破断リスクの高精度な予測モデル化技術の構築などのCAE進化により高い精度で予測可能となった。しかし、衝突時の燃料タンクの挙動やタンク内部のバルブの破損は、衝突により揺動する燃料（流体）から受ける構造体の作用も考慮しなければならない。従来は過去の開発経験からの知見を織り込んで、タンク試作品での実機試験で検証してきたが、実機試験での問題検知と図面仕様の修正の進め方は、開発の最終段階での仕様変更を発生させ、短期開発や低コストの開発の実現のネックとなっていた。

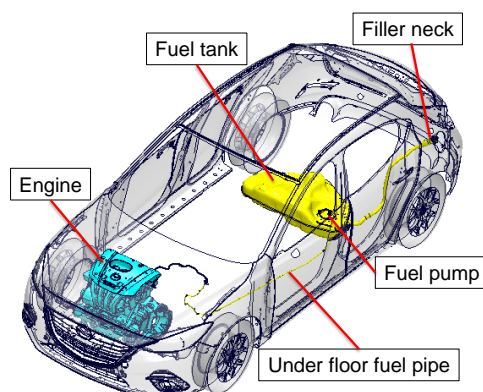


Fig. 1 Vehicle Fuel System

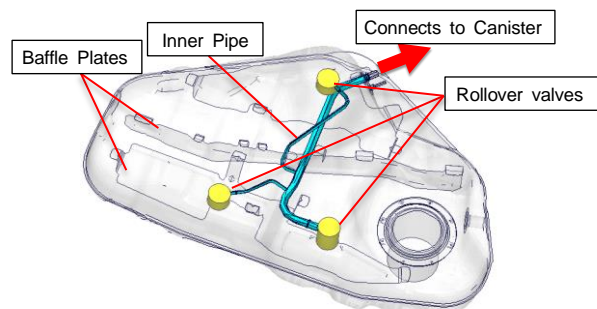


Fig. 2 Fuel Tank Components

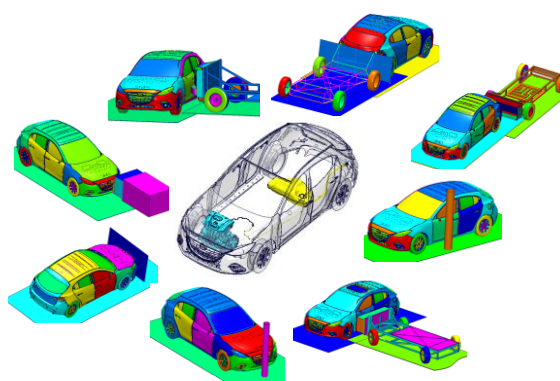


Fig. 3 Crash Simulations

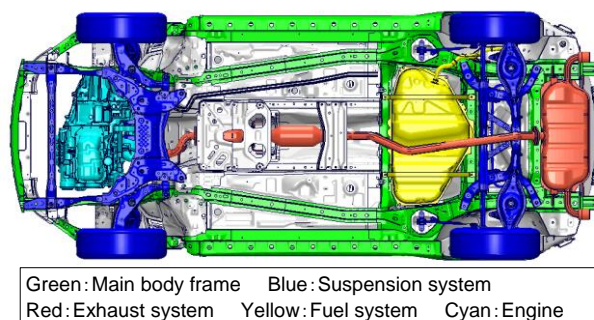


Fig. 4 Under-body Structure

3. 衝突時に燃料タンクの内部で起きている現象

燃料タンクの挙動やタンク内部の機能部品の破損を精度良く予測するには、タンク内部の発現象の見える化が重要である。停車している車両に別の車両が追突する現象を一例に説明すると、追突された車両のタンクは前側に加速されるが (Fig. 5(a)), 内部の燃料は慣性力で、留まろうとするため、燃料は衝突側のタンク壁面を駆け上がり (Fig. 5(b)), その後に戻って渦を形成しながら (Fig. 5(c)), 逆側の壁面まで移動して (Fig. 5(d)) 激しく揺動する。それにより、タンク壁面へ入力が生じ、タンク本体が部分的に膨張したり、内部の機能部品が変形する。これらは閉ざされた空間内で、わずか0.1秒の間に起きる現象であるため (Fig. 6), 定量的な現象把握が重要な課題である。

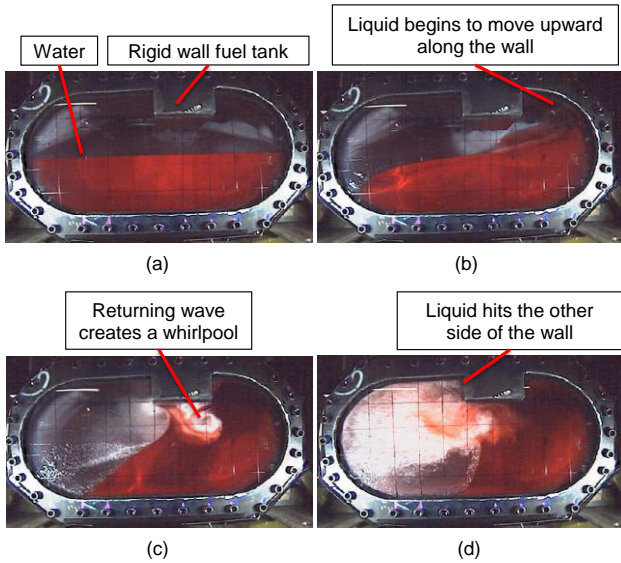


Fig. 5 Liquid Sloshing Motions in Rigid Tank

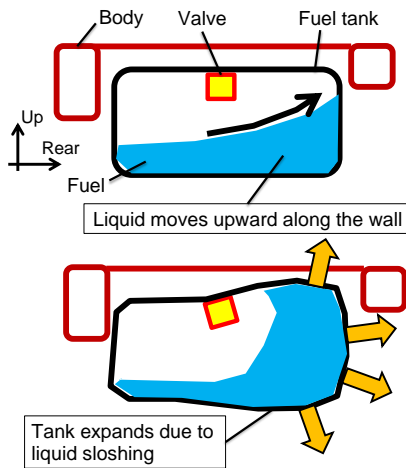


Fig. 6 Fuel Tank Deformation Upon Crash

4. 流体構造連成解析技術の構築

4.1 流体構造連成解析技術の重要性

前述したとおり、衝突時の燃料の揺動とタンク構造の相互作用が燃料漏れ評価に影響する主要因である。そこで、Fig. 7に示すように、タンク内部にバツフル板を設置して、Fig. 5と同様の条件で解析を行った。解析は、汎用非線形解析ソフトウェアのLS-DYNAを用い、流体解析部分をALE (Arbitrary-Lagrangian Eulerian) でモデル化した。構造体の変形を考慮しない流体解析は白線、流体と構造体の相互影響を考慮する流体構造連成解析は赤線で揺動する燃料内のトレーサー粒子挙動を比較した。その結果、流体解析では、燃料の流れがバツフル板によって大きく阻害される挙動となり、一方の流体構造連成解析では、燃料揺動がバツフル板を変形させ、この変形が燃料の流れを変え、トレーサー粒子の最後端部の位置及び流れの方向が異なることを確認した。燃料揺動がタンク構造に作用する荷重の大きさと方向を高精度に予測

し、設計段階で燃料漏れ防止構造を決定するためには、流体構造連成解析技術を用いた高度な予測技術を構築することが必要である。

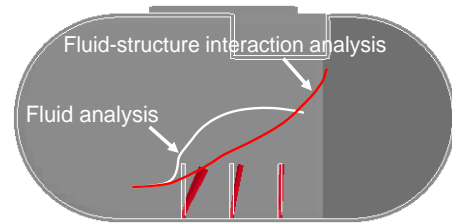


Fig. 7 Comparison of Tracer Particle Paths

4.2 流体構造連成解析技術の開発ステップ

この解析技術の開発は、液体揺動、燃料タンクの変形、車体との干渉を段階的に検証するために、(1) 剛体壁タンク、(2) 実体タンク、(3) 車両状態、の3つのステップで検証した。

(1) 剛体壁タンク

1) 液体挙動の検証

壁面が変形しない剛体壁タンクを試作し (Fig. 8) , 着色水を充填して後面衝突相当の速度変化を与えるスレッド実験を行った。Fig. 9にアクリル製窓からの液体挙動、Fig. 10に壁面圧力の計測結果を示す。液体の挙動は実験、解析ともに40msでタンク上部の圧力センサー1付近に達し、同計測点における壁面圧力も高い精度で一致していることが確認できた。



(a) Top view (b) Side view

Fig. 8 Configuration of Rigid Tank Sled Test

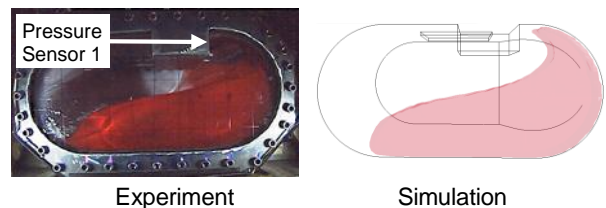
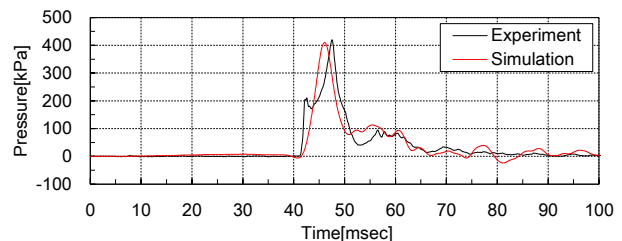


Fig. 9 Liquid Sloshing Motion at 40ms



Pressure at Sensor 1
Fig. 10 Result of Rigid Tank Sled Test

2) 流体構造連成の精度検証

流体構造連成の精度を確認するために、剛体壁タンクの内部底面にFig. 11に示す板厚の異なる3枚のバッフル板を設置し、前述のスレッド実験条件で液体挙動とバッフル板の変位量及び壁面圧力を計測した。解析は、バッフル板を弾塑性体としてモデル化して、ALEと連成させた。

Fig. 12に前述同様の40msでの実験と解析の液体挙動を示す。解析は、バッフル板の変形を実験同様に再現するとともに、構造体の変形による液体挙動の変化も再現している。また、Fig. 13に示すように、バッフル板の変位量は実験、解析ともに高い精度で一致し、壁面圧力も精度良く再現できている。本検証により、流体構造連成解析による構造体への荷重入力の定量評価技術を構築し、燃料タンク内に設置したバルブ等の変形の定量評価を可能にした。

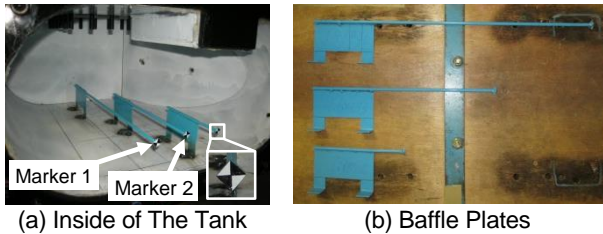


Fig. 11 Configuration of Rigid Tank Sled Test with Baffle Plates

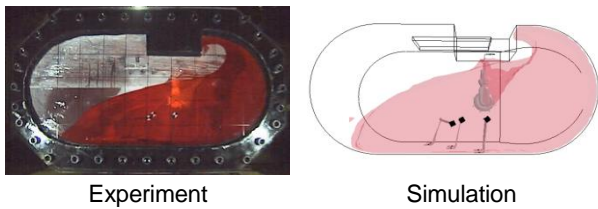


Fig. 12 Liquid Sloshing Motion at 40ms

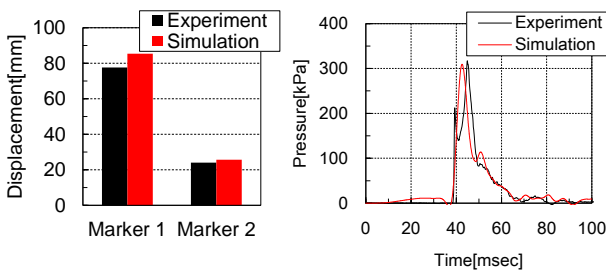


Fig. 13 Results of Rigid Tank Sled Test with Baffle Plates

(2) 実体タンク

前述で検証したモデル化方法と解析手法を実体タンクに適用し、タンク壁面が大きく変形する場合の予測精度を確認した。実験は、BIW (Body in White, ホワイト

ボディー)に燃料タンクを組み付け、前述と同じ条件でスレッド実験を行い、燃料タンク下面の加速度と実験後の燃料タンクの上下面の変形を三次元計測機で測定した (Fig. 14)。また、解析のタンク壁面残留変形量は、燃料揺動後のタンク形状に対してスプリングバック解析を適用して求めた。Fig. 15に示す実験と解析のタンク壁面残留変形量の分布のように、液体揺動によるタンクの膨らみ変形とタンク体積増加の負圧によるへこみ変形がよく再現できている。また、Fig. 16に示すタンク下面の加速度もピークの発生タイミングとレベルをよく再現できている。0.1秒程度の短時間で壁面が大きく変形する実体タンクの検証においても高い精度で現象を再現することを確認した。

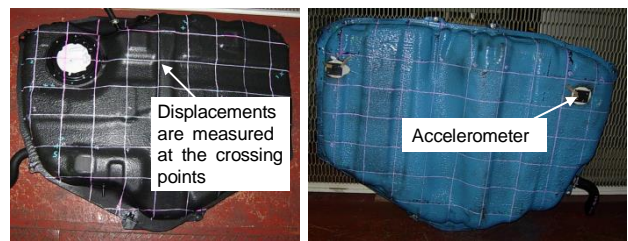


Fig. 14 Grid Lines for 3-D Measurement

	Experiment	Simulation																																																																																																												
			Bulging deformation [mm]	Contraction deformation [mm]																																																																																																										
Upper Pan	<table border="1"> <tr><td>3</td><td>7</td><td>2</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>10</td><td>6</td><td>5</td><td>-2</td><td>-4</td><td>-1</td><td>0</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td>12</td><td>10</td><td>2</td><td>-2</td><td>-8</td><td>-4</td><td>-2</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>5</td><td>6</td><td>4</td><td>-7</td><td>-11</td><td>-8</td><td>-5</td><td>-1</td></tr> <tr><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>-4</td><td>-12</td><td>-9</td><td>-5</td><td>-2</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>-3</td><td>-3</td><td>-8</td><td>-8</td><td>-5</td><td></td></tr> </table>	3	7	2	4	0	1	1	3	4	10	6	5	-2	-4	-1	0	3		15	12	10	2	-2	-8	-4	-2	0	1	5	6	4	-7	-11	-8	-5	-1	2	3	2	-4	-12	-9	-5	-2					-3	-3	-8	-8	-5		<table border="1"> <tr><td>-2</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>-2</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>10</td><td>7</td><td>1</td><td>-4</td><td>-3</td><td>-1</td><td>1</td><td>2</td><td></td></tr> <tr><td>17</td><td>15</td><td>5</td><td>-1</td><td>-6</td><td>-5</td><td>-3</td><td>-1</td><td>1</td></tr> <tr><td>-2</td><td>5</td><td>7</td><td>2</td><td>-8</td><td>-10</td><td>-7</td><td>-4</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>-7</td><td>-13</td><td>-9</td><td>-4</td><td>0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>-4</td><td>-3</td><td>-8</td><td>-9</td><td>-4</td><td></td></tr> </table>	-2	4	0	0	-2	0	0	2	3	10	7	1	-4	-3	-1	1	2		17	15	5	-1	-6	-5	-3	-1	1	-2	5	7	2	-8	-10	-7	-4	0	1	4	2	-7	-13	-9	-4	0					-4	-3	-8	-9	-4	
3	7	2	4	0	1	1	3	4																																																																																																						
10	6	5	-2	-4	-1	0	3																																																																																																							
15	12	10	2	-2	-8	-4	-2	0																																																																																																						
1	5	6	4	-7	-11	-8	-5	-1																																																																																																						
2	3	2	-4	-12	-9	-5	-2																																																																																																							
			-3	-3	-8	-8	-5																																																																																																							
-2	4	0	0	-2	0	0	2	3																																																																																																						
10	7	1	-4	-3	-1	1	2																																																																																																							
17	15	5	-1	-6	-5	-3	-1	1																																																																																																						
-2	5	7	2	-8	-10	-7	-4	0																																																																																																						
1	4	2	-7	-13	-9	-4	0																																																																																																							
			-4	-3	-8	-9	-4																																																																																																							
Lower Pan	<table border="1"> <tr><td>2</td><td>7</td><td>23</td><td>14</td><td>6</td><td>2</td><td>-1</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>9</td><td>25</td><td>48</td><td>28</td><td>6</td><td>2</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>8</td><td>30</td><td>57</td><td>27</td><td>6</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>22</td><td>48</td><td>20</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>29</td><td>11</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>6</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	2	7	23	14	6	2	-1	0	2	9	25	48	28	6	2	-1	0	1	8	30	57	27	6	2	0	0	2	22	48	20	3	1	0	0	3		3	29	11	1	1	1						6	3	0	1				<table border="1"> <tr><td>2</td><td>9</td><td>20</td><td>11</td><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>8</td><td>23</td><td>40</td><td>25</td><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>7</td><td>30</td><td>54</td><td>25</td><td>0</td><td>-1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>22</td><td>49</td><td>19</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>31</td><td>11</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>	2	9	20	11	1	-1	-1	0	0	8	23	40	25	1	-1	-1	0	0	7	30	54	25	0	-1	0	0	0	22	49	19	0	0	0	0	0	0	1	31	11	0	0	0						4	3	0	0			
2	7	23	14	6	2	-1	0	2																																																																																																						
9	25	48	28	6	2	-1	0	1																																																																																																						
8	30	57	27	6	2	0	0	2																																																																																																						
22	48	20	3	1	0	0	3																																																																																																							
3	29	11	1	1	1																																																																																																									
		6	3	0	1																																																																																																									
2	9	20	11	1	-1	-1	0	0																																																																																																						
8	23	40	25	1	-1	-1	0	0																																																																																																						
7	30	54	25	0	-1	0	0	0																																																																																																						
22	49	19	0	0	0	0	0	0																																																																																																						
1	31	11	0	0	0																																																																																																									
		4	3	0	0																																																																																																									

Fig. 15 Comparison of Deformed Fuel Tank Shapes

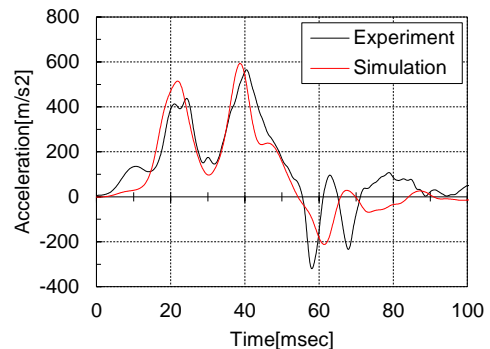


Fig. 16 Acceleration at Bottom of Fuel Tank

(3) 車両状態

タンク周辺部品の構造物と干渉する車両状態での精度を検証するために、車両にMoving Deformable Barrierを後面衝突させる実験を行った (Fig. 17)。前述のスレッド実験と同様に燃料タンク下面の三次元形状の変形量を計測した。

Fig. 18に示す実験と解析のタンク壁面残留変形量のように、車両状態のタンク壁面の膨らみ変形とへこみ変形がよく再現できることを確認した。

以上の流体構造連成解析技術開発の結果、液体挙動、バルブ等の部品への荷重入力、燃料タンク挙動が高精度に予測可能であることから、本技術が次世代商品群をはじめとする車両開発へ適用可能であることを確認した。



Fig. 17 Configuration of Crash Test

		Experiment						Simulation							
Lower Pan		-2	1	5	7	7	-8	0	-5	-1	6	6	4	-4	-4
		-2	2	8	11	10	-3	0	-5	1	10	11	10	1	-2
		-2	3	11	16	15	8	3	-5	2	14	16	17	9	0
		-3	4	12	17	14	11	2	-6	4	16	21	22	12	0
			2	15	21	22	7			2	20	25	27	8	
					19	12						19	15		

Fig. 18 Comparison of Deformed Fuel Tank Shapes

5. 開発への適用

次世代商品群では、流体構造連成解析を用いて、衝突時の燃料揺動によるタンク内のバルブへの入力荷重の大きさ、その方向、タンクの局所的な膨張、全体の挙動を予測し、燃料漏れ防止構造を設計段階で決定した。この結果、開発の最終段階における性能確認車による燃料漏れ防止に関わる設計変更要求がゼロにでき、計画どおりに市場導入することに貢献した。

6. おわりに

次世代商品群の開発に、マツダが長年取り組んできたCAE技術と流体構造連成解析を組み合わせた新たな性能開発技術を適用した。この結果、優れた衝突安全性能を効率的に実現する燃料タンク構造を構築した。

マツダは理想の性能と品質を追求する有効な手段としてCAE技術を活用した車両開発を進めている。マルチフィジックス解析による現象解明と設計支援は、複雑な物理現象の領域において部門を超えた活発な共創を可能に

している。今後も積極的にCAE技術を開発し、マツダらしいクルマをつくる構想・詳細設計の要として、更なる進化とより良い商品の開発に取り組んでいく。

■ 著 者 ■



山内 一矢



嘉村 浩二



花田 裕



小島 宏介