### 液体輸送車両の内容液における挙動の把握

中央大学大学院 学生員 〇因 和樹 (㈱+川ゴム 正会員 河田 彰中央大学 正会員 平野 廣和 中央大学 正会員 佐藤 尚次

### 1.はじめに

ISO タンクコンテナ等の液体輸送車両がブレーキや 急加速等の制動操作の際に内容液が大きく揺動し、車 両の追突や横転事故を発生させる場合もある.具体的 な要因としては、急ブレーキの際に発生する液面揺動 (スロッシング現象)やカーブ走行中に発生する左右方 向の液面揺動(ローリング現象)が考えられている.ま た急制動でのハンドル操作で、内溶液に押されること により生じるジャックナイフ現象により、トレーラー が横転する等の現象が起こる<sup>1)</sup>. 危険物輸送車では, コ ンテナ内を隔室で分離するなどの法的な対策が採られ ているが、それ以外の液体輸送車では規制はなく、運転 者の熟練技術や経験によって対応されているのが現状 である. そこで本報では, 液体輸送車両の液動によって 生じる事故の危険性を低減することを目的とし、液面 揺動発生のメカニズムとその影響の分析を行うもので ある.具体的には、液体輸送車両を用いた走行試験によ って得られた実証データの分析と数値流体解析の2種 類の異なる手法での分析を行い、液体輸送車両の内容 液における挙動の把握を目的とする.

#### 2. 走行試験概要

**写真-1**に走行試験に用いる ISO タンクコンテナ搭載 トレーラー(以下, ISO タンクとする)を示す. タンク の大きさは ¢ 2,333mm×5,000mm である. また, **表-1** に ISO タンクの諸元を示す.

本試験では、道路交通法で許される最大積載重量の 水深 1,500m として、この搭載車を公道上に設置した直 線の試験区間と一般道で走行試験を行う.この走行試 験条件を表-2 に示す.条件 1 では一定速度後に急ブレ ーキで発生する内容液の揺動を検証する.また、条件 2,3 は、一定速度後に通常ブレーキにおいて発生する内 容液の揺動を検証する.さらに、条件 A は、一般道で 通常走行した場合に運転へ及ぼす影響を検証する.評 価方法は、ISO タンクに設置した内部カメラによる内部 映像と運転席とコンテナに設置した加速度計の計測結 果、同時にデジタルタコグラフ(以下、デジタコ)での 計測を行い、搭載車に生じるメカニズムの把握を行う.

#### 3. 解析概要

数値流体解析には,汎用有限要素解析ソフトウェア である ADINA を用いる.このソフトの特徴は,流体部 のみの解析と流体問題と構造問題を一つのマトリック スで解くタンクー流体連成解析<sup>2)</sup>が可能となっている ことである.本解析に用いる ISO タンクの解析モデル を図-1 に示す.また,タンク部を Shell 要素,流体水面 を自由水面とし,ポテンシャルベース 3D 流体方程式を 用いて解析を行う.要素数は 233,753 である.

### (1)固有值解析

算出したスロッシング固有振動数の解析値と Housner の式(1)から液面モードの算出を行い,可視化



写真-1 ISO タンクコンテナ搭載トレーラー

↓ ↓	SOダングの諸条件
タンク種類	ISOタンク
材質	SUS316 SUS316L
外径(mm)	2333
半径(mm)	1166.5
幅(mm)	5000
板厚(mm)	25
水位(mm)	1500
水の密度(kg/m <sup>3</sup> )	1000
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	2.06E+11
ポアソン比	0.3
タンクの密度(kg/m <sup>3</sup> )	7900
タンク部	Shell要素
流体部	ポテンシャルベース3-D流体要素
拘束条件	タンク底面(X,Y,Z方向)
流体水面	自由水面



**表−2** 走行試験条件 宝驗条件 時谏 定速度時間 計測内容 実施回数 水深 条件1 1500 mm 20 km/h 急停止(1回だけ踏む スタート地点から 約 5秒 デジタコ 1500 mm 3回 条件 2 20 km/h 通常通り 約 5秒 約 100 m 離れた地点 内部カメラ 条件 3 1500 mm (目安) 40 km/h 通常通り 約5秒 加速度計 条件 A 1500 mm 般道での 運行 表--2 ISO タンク スロッシング固有振動数 1次[Hz] 2次[Hz] 連成解析 0.342 0.697 Housner式 0.347 0.683 (a)1 次モード (b)2 次モード 図-2 液面モード

することで液面挙動の把握を行う.

$$f_{i} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2i-1)\cdot\pi\cdot g}{L}} \cdot \tanh\left[\frac{(2i-1)\cdot\pi\cdot H}{L}\right] \tag{1}$$

*f<sub>i</sub>:スロッシングi*次固有振動数, H:水位, L:幅 (2)時刻歴応答解析

タンクー流体の連成体を行う場合,まず自重の釣り合い計算を行うための静的解析を行い,これを動的計算の初期条件とする.次に動的解析を行い,本報では加速度を入力条件とする.ところで流体の基礎方程式はポテンシャル流であるので,減衰として実験から得られた減衰をRayleigh減衰の形で与える.しかしADINAはこの減衰を構造部分の要素のみにしか付加することができないので、特殊なモデル化として自由水面としている液面表面に,無視できる程度の厚さの薄いShell要素を仮定し,ここへ減衰を与えることとする.

キーワード :液体輸送車両,スロッシング現象,走行試験,時刻歴応答解析 連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

### 4. 実験及び解析結果

### (1)固有振動数

表-2, 図-2 に連成解析値と Housner の式から算出し たスロッシング振動数の値の結果と液面モードを示す. これにより, それぞれ Housner の式の値との比較的一致 しており, ISO タンクは 0.34Hz,0.69Hz のときに 1, 2 次 モードが生じ, 液面に大きな影響を与えることが確認 できる.

# (2) 条件1の結果

図-4 に条件1での加速度波形を,写真-2 に内部カメ ラで撮影したタンク内部映像を示す.図-4 の結果から 急ブレーキを踏んだ際に急激な加速度ピークが現れて いることがわかる.写真-2 における内部映像より内容 液の挙動を確認すると,急ブレーキを踏んだ直後,内容 液の激しい揺動が見られる.このとき,運転席側にも激 しい揺れが生じ,これは液体揺動の影響と考えられる.

### (3) 条件 2,3 の結果

図-5,図-6に条件2,3での加速度波形を示す.この 結果から通常ブレーキの操作1度では停止ができず, 数度に分けてブレーキ操作が必要となることがわかる. また,ブレーキを踏んだ直後は,内容液の激しい揺動が 見られ,激しい揺動がしばらく続く.したがって,一度 のブレーキ操作のみでトレーラーを安全に停止させる ことが困難であり,特に速度が上がる程,顕著である.

# (4) 条件 A の結果

図-7 に条件 A でのパワースペクトルを示す. 二つの 加速度結果から 0.4Hz 付近で卓越していることがわか る. これは, スロッシング1次モードであると考えられ るので,通常走行においてもスロッシング現象等によ りトレーラーに負荷がかかっていることがわかる.

### (5)時刻歴応答解析

図-8 に条件1における運転席側方向の端部中央での時刻歴応答波高を示す。急ブレーキ後に内容液が揺動して前方へ移動することで,最大波高約800mmに達し, 天井に接触するほどの波高が算出されている.また,流体の前方への移動時では,液面の揺動が周期約4秒となっているが,その後,周期約3秒となっており,タンク内で1次モードのスロッシング挙動が起きていることがわかる.今回の走行試験では波高データは計測していないため直接の評価できないが,映像で得られた現象は再現できていると考えている.

### 5.おわりに

走行試験では、どの条件であっても内容液の激しい 液面揺動が見られた.また、試験区間では、一度のブレ ーキのみで停止することができず、内容液の揺動に合 わせてブレーキを踏む必要があることが確認できる. また、公道上の走行では、内部映像や加速度波形の結果 から、内容液が揺動しているときは内容液が前方にく るタイミングでアクセルを踏まないと前進することが できないことも確認できた.これより、エンジンに大き な負担が掛かり、燃費をロスさせており、安全性向上だ けではなく燃費向上といった全く違う分野への問題点 も明らかにした.

次の展開として、時刻歴応答解析の再現性の精度を 高めること、さらにデジタコのデータ等から燃費に注 目することによって搭載車に生じる挙動の把握を行う. 謝辞本研究の一部は科学技術振興機構マッチングプラン



図-4 条件1:直線区間非通常ブレーキ時 加速度波形 (20km/h)



ナープログラムの助成を受けたことを付記する.

#### 参考文献

- 1) 渡邊豊: トレーラー横転事故の実態と対策, 予防時報 242, 2010.
- 平野他:浮屋根式タンクのスロッシング時の挙動把握のための流れと構造の連成解析,構造工学論文集,2007.4.