

## LNG 受入基地のためのロールオーバーシミュレーション

### Rollover Simulation in LNG Storage Tank

高橋 公紀\*1、神谷 篤志\*2

Kiminori Takahashi\*1, Atsushi Kamiya\*2

\*1 エンジニアリング本部 EN テクノロジーセンター、\*2 第3プロジェクト本部 プロジェクト第2部

\*1 EN Technology Center, Engineering Division, \*2 No.2 Project Department, No.3 Project Division

#### 要旨

LNG 受入基地は、さまざまな産地から密度の異なる LNG を受け入れて貯蔵している。密度の異なる LNG をタンクに貯蔵した場合、ある条件下でロールオーバーという現象が発生する。ロールオーバーは LNG を急激に気化させて大量のガスを発生させるため、大事故につながる可能性がある。このような現象を回避するために、CFD を用いたロールオーバーシミュレーションが LNG 受入タンクの設計と運転管理に利用されている。

#### Abstract:

LNG receiving terminals receive and store LNG at different densities from various producing areas. When LNG at different densities is stored in an LNG tank, a phenomenon called rollover occurs under certain conditions. A large amount of LNG is rapidly vaporized during the rollover of LNG, which may lead to a major accident since the pressure in the LNG tank suddenly increases. In order to avoid this problem, CFD is used to simulate the rollover phenomenon.

#### 1. はじめに

2011年東日本大震災後に原子力発電所が停止した日本では、LNG (Liquefied Natural Gas, 液化天然ガス) による火力発電量が増加し、LNGの輸入量が急増した<sup>1)</sup>。さらに、LNG受入基地の建設計画も増加している。一方、従来のLNG産地に加えて、2017年より米国のシェールガスから生産されるLNGが輸入される計画である<sup>2)</sup>。さまざまな産地のLNGを同一の大型タンクで貯蔵する場合、LNG受入基地の設計と運転管理に細心の注意が必要となる。本稿では、LNG受入タンクの設計と運転管理に利用されるロールオーバーシミュレーションについて紹介する。

#### 2. LNG タンクにおけるロールオーバー現象

##### 2. 1 LNG の組成と密度

天然ガスはメタンを主成分として、エタン、プロパン、ブタンなどから構成される。気体である天然ガスを約-160℃に冷却して液体にしたものが LNG である。その組成は産地により少

しずつ異なり、メタンの濃度が高いものは低密度の LNG、メタンの濃度が低いものは高密度の LNG となる。

米国発のシェールガス革命により、シェールガスから生産される LNG が日本において 2017 年に調達可能となる。シェールガスから生産される LNG は、従来の LNG に比べてメタンの濃度が高いために、低密度となる。

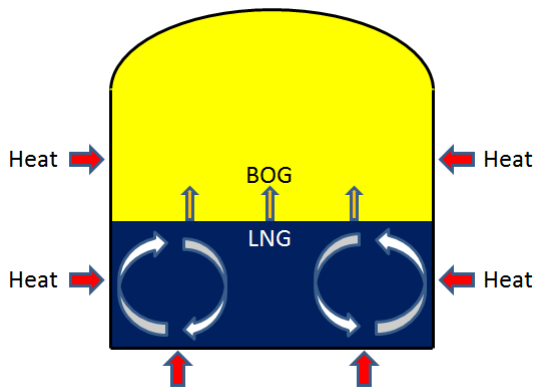
## 2. 2 LNG の対流

LNG をタンクに貯蔵すると、**Fig.1** に示すようにタンク内に対流が生じる。

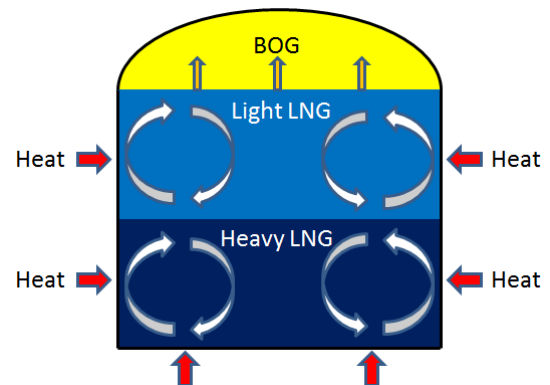
タンク壁面からの入熱によって、壁面近くの LNG の温度は高くなる。そして、LNG の密度が低くなるため、浮力によって壁面に沿って LNG は上昇する。液面では、LNG の温度が約  $-160^{\circ}\text{C}$  に達すれば、LNG に含まれるメタンが気化して BOG (Boil Off Gas) が発生する。LNG に含まれる密度の低いメタンが減少し、LNG は濃縮されて密度が高くなる。BOG 発生による蒸発潜熱により LNG の温度は低くなり、LNG の密度はさらに高くなるため、液面に上昇した LNG は下降していく。

## 2. 3 LNG の層状化

さまざまな産地から輸入される LNG はその組成が異なるため、二種類の密度の大きく異なった LNG をタンクに受入れて貯蔵すると、LNG が上下二層に分離 (層状化) する可能性がある。**Fig.2** に示すように、層状化した状態で対流が生じる。



**Fig.1** Schema of one layer flow



**Fig.2** Schema of two layer flow

## 2. 4 ロールオーバー現象

層状化した状態で一定の時間が経過すると、BOG 発生により上層の LNG 密度は徐々に高くなり、ある時刻になると上層と下層の密度が一致する。二層の密度が一致した時点で二層の境界が消滅して、上下が急激に反転して LNG が混合する。この現象をロールオーバーという。

ロールオーバーが発生した場合、下層の LNG に蓄えられた熱エネルギーが急激に放出され、短時間に大量の BOG が発生する。その結果、タンク内圧が急上昇し、場合によってはタンクが破損するような極めて危険な状態となる。1971 年にイタリアのラ・スペティア (La Spezia) LNG 基地でロールオーバーが発生して、大量の BOG を大気放出した事例が有名である。

## 2. 5 ロールオーバー対策

このような理由から、密度の異なる LNG を同一タンクで貯蔵する場合、層状化を回避するためのロールオーバー対策が必要となる。LNG 受入時には、LNG の組成と密度を把握して

LNG を混合しながら、受入終了時点で LNG を完全に混合することが望ましい。

そこで、LNG 受入時の混合シミュレーションを実施して、LNG の層状化の有無など混合状態を把握する。シミュレーションの結果は、設計時においてはタンク内の受入ノズルやジェットミキシングなどの設備、運転時においては LNG の温度や密度、受入液位などの管理に利用される。さらに、LNG タンクのみならず、LNG 受入基地の運転計画、各地の LNG 基地の役割や運用方法の改善に役立てられる。

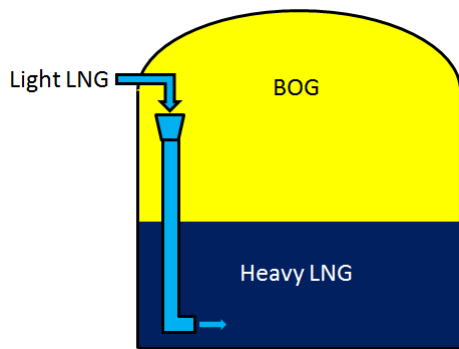
### 3. ロールオーバーシミュレーション

#### 3. 1 受入時、密度の異なる LNG の混合状態

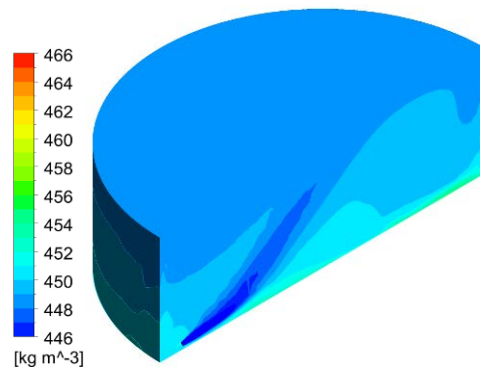
LNGタンクに密度の異なるLNGを受け入れる場合、まずはタンク内のLNGの混合状態、さらに層状化の有無を確認する必要がある。そのために、CFD (Computational Fluid Dynamics) を利用<sup>3),4)</sup>して、LNGの混合状態についてシミュレーションを実施した。

シミュレーション条件として、東京ガス 小山の報告<sup>5)</sup>を対象とした。**Fig.3** に示すように、高密度LNGが貯蔵されたLNG地下タンク（容量 200000 m<sup>3</sup>、内径 72 m）に、下部L型ノズル（内径 0.7 m）から低密度LNGを受け入れた。受入条件は初期密度差 8 %、初期液位 13 m、受入流量 11000 m<sup>3</sup>/hであり、受入開始から 4 時間後に液位は 24 mとなる。報告には密度の記載がなかったため、初期密度差 8 %となるように、初期LNGを高密度 466 kg/m<sup>3</sup>、受入LNGを低密度 429 kg/m<sup>3</sup>とした。

**Fig.4** に、受入開始から 4 時間後の LNG 密度分布を示す。下部ノズルから受け入れた低密度 LNG は浮力により上昇して、混合しながら液表面に達した。その後、混合した LNG は穏やかに流れてタンク上部に広がった。



**Fig.3** Schema of receiving LNG



**Fig.4** Contours of density after 4 hours

**Fig.5** に、タンク高さ方向のLNG密度分布の経時変化を示す。LNG受入開始から 0.5 時間後の密度差は約 4 kg/m<sup>3</sup>であった。その後、密度差は 1 時間後と 2 時間後に 6 kg/m<sup>3</sup>以上となったが、4 時間後には 4 kg/m<sup>3</sup>以内となった。密度差は 1 % 以下と低いことから、LNGはよく混合しており層状化は生じないと判断する。**Fig.5** に示す計算値と実測値はほぼ一致したことから、シミュレーションモデルの妥当性が確認できた。

このシミュレーションモデルを活用することによって、さまざまな受入条件における密度の異なる LNG の混合状態、層状化の有無の予測が可能となる。さらに、ジェットミキシングなどを用いた場合の混合効果も予測可能となる。

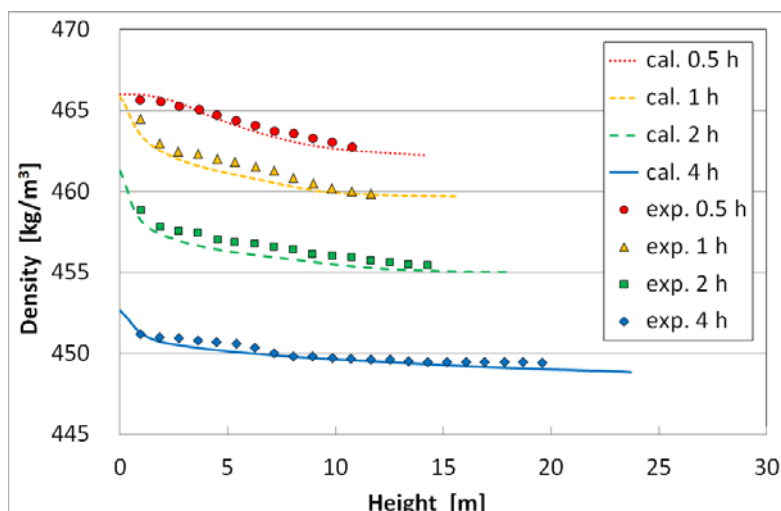


Fig.5 LNG density profile in tank

### 3. 2 ロールオーバー発生時刻とBOG発生速度

ロールオーバー発生時刻とBOG発生速度についてシミュレーションを実施した。シミュレーション条件として、東京ガスの神谷らが実施した大型LNGタンク（内径 64 m）でのロールオーバー実験<sup>6)</sup>を対象とした。シミュレーションでは以下の条件を考慮し、**Fig.2** に示すような層状化の状態を初期条件とした

- ✓ LNG の物性値（密度、粘度、熱伝導率、比熱）
- ✓ タンク壁面からの入熱
- ✓ BOG の発生

**Table 1** に初期の LNG 組成、**Table 2** に初期の LNG の温度、密度、高さを示す。

**Table 1 Initial LNG composition**

Composition [mol %]	Heavy LNG	Light LNG
CH <sub>4</sub>	90.67	93.06
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	4.46	3.52
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3.24	2.27
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.54	1.09
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.03	0.02
N <sub>2</sub>	0.06	0.04

**Table 2 Initial LNG condition**

Spec.	Heavy LNG	Light LNG
Temp. [°C]	-157	-161
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	457	451
Height [m]	4.007	7.111

**Fig.6** に、LNG の速度ベクトル分布、温度分布、密度分布の経時変化を示す。LNG 受入開始から 10 時間後には、各層ごとに大小の渦が表れた。流速 0.1 m/s 程度の緩やかな流れによる渦は左右に移動しながら、渦の生成と消滅を繰り返した。下層に比べて上層の渦が大きいために、上層が下層を浸食するように混合して、上下層の境界面の位置を下げた。この現象は実験でも観察された。130 時間後、LNG は混合して均一となってロールオーバーが発生した。

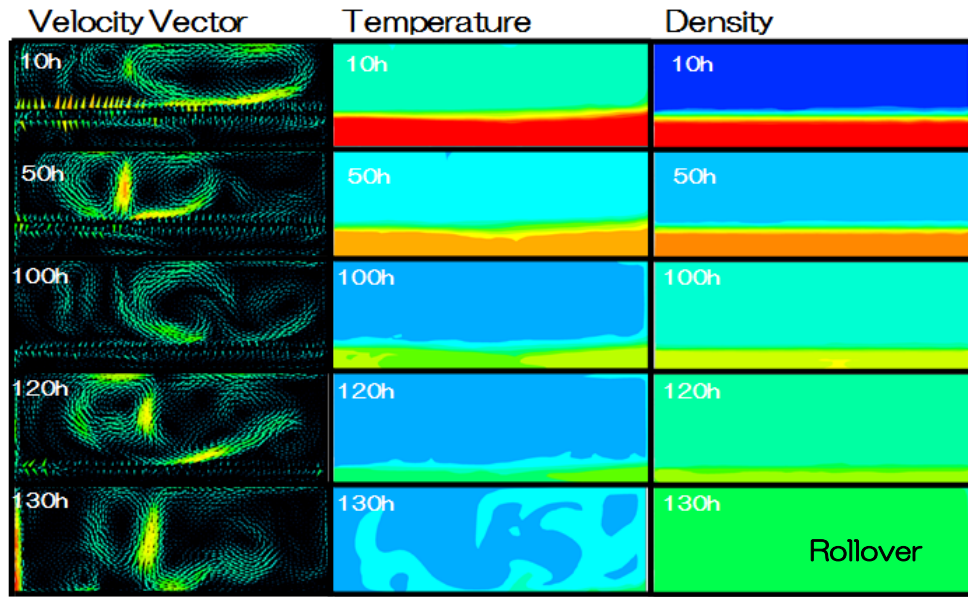


Fig.6 Rollover simulation results by velocity vector, temperature and density

Fig.7 に、LNGの密度と温度の経時変化を示す。上層と下層のLNGの温度と密度は徐々に近づき、130 時間後に一定となった。上下層のLNGの密度が均一となることによって、急激にLNGが混合してロールオーバーが発生する。LNGが気化する温度の影響によって、上層の温度  $T_{Upper}$  はほぼ一定に保たれる。

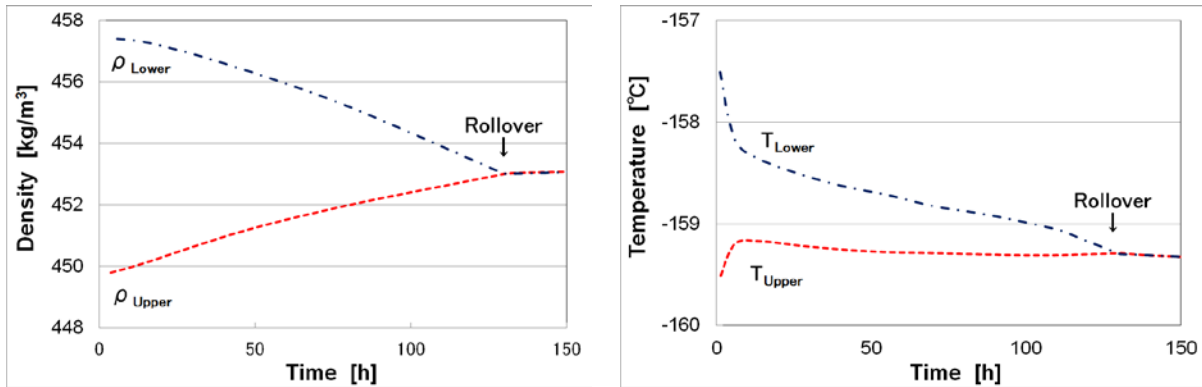


Fig.7 Comparison of temperature and density in two different layers with time

Fig.8 に、BOG発生速度の経時変化を示す。受入開始直後からBOG発生速度が増加して、20 時間後には  $3500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  に増加した。その後、徐々に低下して 80 時間後に  $2500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  となり安定した。130 時間後、BOG発生速度は短時間で  $2800 \text{ Nm}^3/\text{h}$  に達した。短時間に大量のBOGが発生することがシミュレーションで再現された。ロールオーバー発生は実験では 180 時間後、シミュレーションで 130 時間後と多少短くなった。BOG発生速度は実験では  $3000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、シミュレーションでは  $2800 \text{ Nm}^3/\text{h}$  とほぼ一致した。

このシミュレーションモデルを活用することによって、LNG の組成、物性値、上下層高さなどの条件を考慮して、層状化後のロールオーバー発生時刻と BOG 発生速度の予測が可能となる。

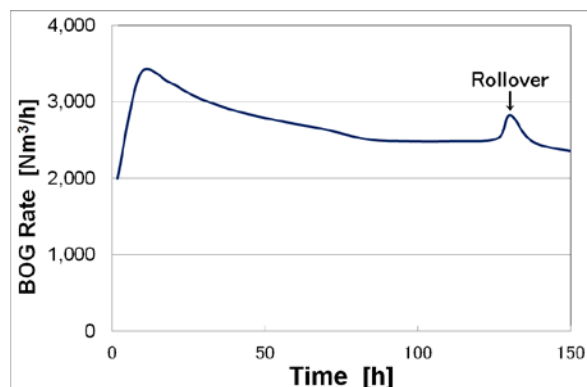


Fig.8 BOG generation rate with time

#### 4. おわりに

今回紹介したロールオーバーシミュレーションは、LNG タンクの設計や運転管理に活用されている。さらに、LNG タンクのみならず、LNG 受入基地の運転計画、各地の LNG 基地の役割や運用方法の改善に役立てられる。当社は、このようなエンジニアリング技術を駆使して、LNG 受入基地建設の競争力強化、オペレーションの安全確保に貢献している。

#### 参考資料

- 1) 財務省貿易統計, 液化天然ガスの輸入量, 統計情報サービス,  
<http://toukei-is.com/h/?p=3050103&f=00&t=0&ie=0>
- 2) SankeiBiz, “米国産シェールガス輸入解禁 日本に朗報、LNG 安価調達の武器に”,  
<http://www.sankeibiz.jp/macro/news/130520/mca1305200701005-n1.htm>
- 3) 高橋, 渡邊, CFD を活用した攪拌装置の設計, 日揮技術ジャーナル Vol.1 No.10 (2011).
- 4) 高橋, オイル&ガспラントの安全を守るガス爆発シミュレーション技術, 日揮技術ジャーナル Vol.2 No.3 (2011).
- 5) Koyama K. CFD simulation on LNG storage tank to improve safety and reduce cost,  
*Proc Jpn Soc Simul Technol.* 2006.
- 6) Kamiya A, Tashita M, Sugawara Y. An experimental study on LNG rollover phenomenon, *Proc The National Heat Transfer Conf.* August 1985.