

天然ガスと管路系流体解析

秋村 友香*

The Natural Gas and Fluid Analysis of Piping System

Yuka Akimura*

LNG は液化天然ガス (Liquefied Natural Gas) の略で、メタン、エタン、プロパン等の混合の天然ガスを冷却し液化した液体のことである。天然ガスをマイナス 160℃ 近くまで冷却すると液体となり体積が少なくなるため、天然ガスは液化された LNG の状態で輸送および貯蔵される。天然ガスは都市ガスとして使用されるが、燃焼時の二酸化炭素排出量が少ないため、クリーンなエネルギーとして注目を集めている。本稿では、天然ガスを取り巻く物理現象や、天然ガスに関連する機器について流体解析の観点から紹介する。また、アドバンスソフト株式会社の管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet /Γ を用いたガスのパージ解析事例について紹介する。

Key word: 天然ガス、LNG、-160℃、輸送、液化、気化、パージ

1. はじめに

日本の発電量の内訳をエネルギー別にみると、2008 年度では石油石炭系が 1/3、原子力が 1/3、天然ガスが 1/3 を占めている[1]。エネルギー資源に乏しい日本は、天然ガスを輸入してその大半を火力発電の燃料と、残りを都市ガスとして利用している。天然ガスは、メタン、エタン等の複数の成分から成るが、これを冷却して液化し、LNG として輸送・貯蔵し、気化させてから利用される。

天然ガスまたは LNG の挙動を数値計算によって把握するためには、天然ガスの流体的性質やガス⇄液間の相変化の特性を理解する必要がある、これらが可能になると運転条件変更や効率化の検討に役立てることができる。

天然ガスまたは LNG は、タンクや気化器においては気液の 2 相が混じっているが、パイプラインにおいてはガスまたは液状態で流れている。天然ガスまたは都市ガスの輸送パイプラインを解析では、混合成分の流動組成変化や、圧力応答、熱流動変化、流体機器との連成のニーズがある。

LNG の管路系流体解析では、特に液撃や、熱流動変化、流体機器との連成についてニーズがある。また、タンクや気化器などの気液 2 相の流体機器をモデリングすれば、これらは管路系流体解析の境界条件として扱うことができる。

本稿では、天然ガスの一生や天然ガスを取り巻く物理現象についてまとめ、どのような解析ニーズがあるかを紹介する。

2. 天然ガス・LNG の性質

2.1. 天然ガスの組成

天然ガスはメタン、エタン、プロパン、ブタン、ペンタンなどの成分から構成される。その成分比は産地によって異なり、アラスカ産天然ガスは純度が高くほとんどメタンから構成されるが、ブルネイ産やマレーシア産では純度が低い[1]。日本の天然ガス輸入先は、インドネシア、マレーシア、ブルネイ、オーストラリア、UAE、カタール、オマーン、ロシアなどである[3]。また、国産の天然ガスとしては、新潟県や千葉県を中心に生産されている[4]。

組成の面で問題になるのは、混合流体の物性や、燃焼時の熱量である。メタン成分が多いほど熱量が少ない。都市ガスで利用するためには熱量が一

*アドバンスソフト株式会社 第 2 事業部
2nd Computational Science and Engineering
Group, AdvanceSoft Corporation

定であることが望ましいが、産地により組成が異なるため熱量を調整する必要がある。また、のちに説明するが、異なる組成の LNG を貯蔵する際のロールオーバー現象も問題となっている。

2.2. 天然ガスの物性

天然ガスを構成する各成分の物性を表 1 に示す。これらの混合物性が天然ガス物性となる。メタンが主成分のため、天然ガス物性はメタン物性でほぼ近似することができる。天然ガス物性の沸点は -162°C で、液化することにより体積が約 600 分の 1 となるため、輸送時や貯蔵時には液化される。ただし、液の状態を保つための冷却コストがかかる。

熱を与えて気化させる場合は、それぞれの成分の沸点が異なるため、沸点の高いものから順に気化される。熱量は分子量が大きいほど大きい。熱量を一定に保つには混合割合の調整が必要となる。

表 1 天然ガス組成の沸点と発熱量[5]

成分	ガス比重 [空気=1]	総発熱量 [MJ/kg]	沸点 [$^{\circ}\text{C}$]
メタン	0.5547	55.59	-161.5
エタン	1.0465	51.95	-88.6
プロパン	0.5076	101.8	-42.1
ブタン	0.5847	134.0	-0.5

2.3. 石油ガス

液化石油ガス(LP ガス、LPG)とは、プロパンを主成分に、その他ブタンなどの比較的液化しやすいガスが含まれているものの総称で、プロパンガスとも呼ばれる。

都市ガスはメタンが主成分で、各家庭へ地中のパイプラインを使って輸送されるが、LP ガスは販売業者からボンベの形で出荷される。都市ガスは空気より軽く、家庭で漏れた場合は天井のほうへ溜まるが、LP ガスは空気より重いいため、低い場所に溜まる性質がある。

3. 天然ガスの一生

LNG を利用するためには、ガス井、液化施設、LNG 船、受入基地、気化設備など「LNG チェーン」と呼ばれる一連の設備が必要である[1]。

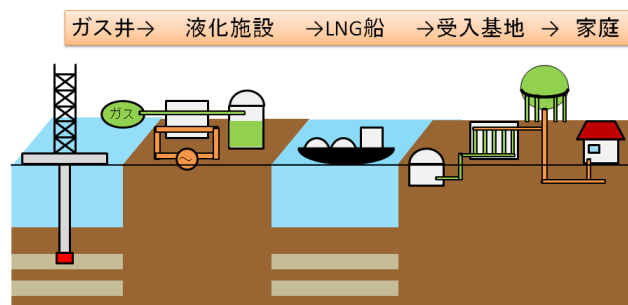


図 1 LNG チェーン

3.1. 探掘

天然ガスは地中深くに溜まっており、これを探掘する。天然ガスを探掘するガス用の井戸をガス井（ガスせい）と呼ぶ。ここから掘り出されるものは水と油とガスが混じったものであるため、気液分離器（セパレータ）によってガスとその他に分離される。

3.2. 液化施設

天然ガスが探掘された後は、これを貯蔵・輸送するために液化される。天然ガスを大型の冷凍圧縮機を用いて冷却することにより液化がなされる。大型の圧縮機を駆動するには発電施設用の大型ガスタービンが用いられ、これらの冷凍サイクルの冷媒としては、プロパン、エチレン、メタンが使用される[7]。

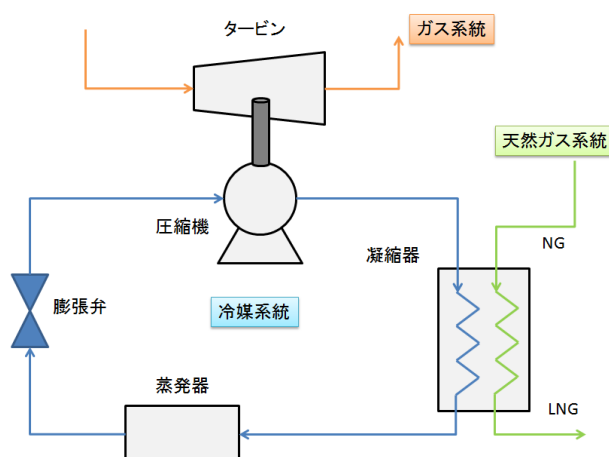


図 2 液化プロセスイメージ

3.3. LNG 船

LNG は船（タンカー）で運ばれ、1 回の運搬で 20 万件の仮定の年間ガス使用量を運ぶことができるものもある[8]。船には LNG のタンクが備え付けられている。タンクは断熱性を高めて作られているが、LNG の冷却は行われなため、航海中には一部が蒸発しガス圧が高くなる。タンク内のガス圧制御などが行われる[9]。

3.4. LNG 受入基地

LNG 船から LNG の受入、貯蔵、気化を行う施設を LNG 受入基地と呼ぶ。受入基地は LNG 船から受け入れやすいように、沿岸部に立地する。日本の LNG 受入基地の位置を図 3 に示した。全部で 41 か所に基地があり、その全てが沿岸部にある。

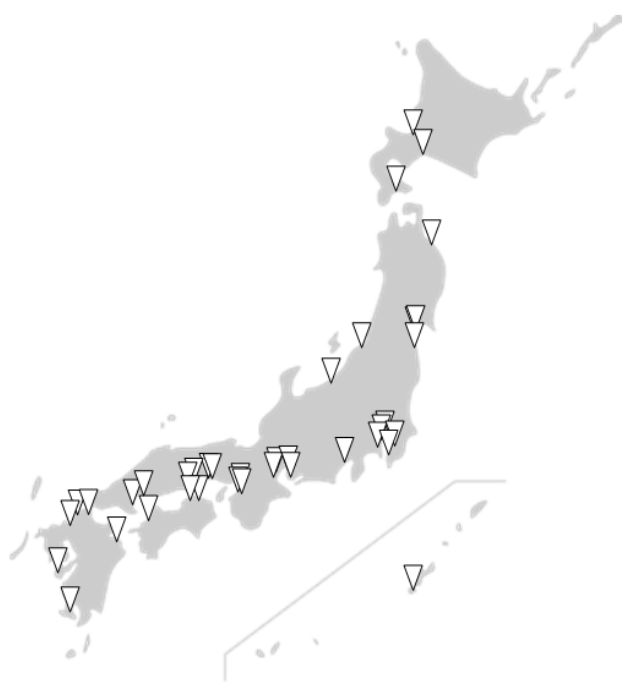


図 3 日本の LNG 受入基地

3.4.1. LNG の貯蔵

LNG は LNG 船から貯蔵タンクに輸送されそこに一時蓄えられる。貯蔵タンク内では、LNG は受け入れ時に減圧沸騰し、また、液面からは温度差による蒸発が起こる。蒸発が起こるとガス圧が上がり危険なため、ガス圧を下げるためにガスを引く。引かれたガスは圧縮機で液化して貯蔵タンクに戻したり、そのままガスとして利用される。

受け入れは数日おきなどに行われるが、それぞれの産地が異なると LNG 組成が異なる。貯蔵タンクの上部から LNG を受け入れる場合、ある密度の LNG の上に異なる密度の LNG が受け入れられると、タンク内の LNG が 2 層またはそれ以上に層状化する場合がある[11]。タンク内では密度差による対流が起こっているが、対流が各層の中でのみ行われ、全体の LNG が均一化しないような現象である。また、タンク内で層状化が起こっていて、対流や熱移動によって両層の密度差が解消されるときに、それまで下層に蓄積されていた熱が短時間に解放され、大量の蒸発が起こる現象はロールオーバーと呼ばれる。上層と下層が逆転するイメージでこのような呼ばれ方をしている。ロールオーバーはタンク内のガス圧の急上昇をもたらすため、危険である。このような現象を起こさないために、貯蔵タンクの管理ではさまざまな工夫がなされている。

LNG 貯蔵タンク内の数値シミュレーションは、3 次元の気液 2 相流解析が有効である。数日間などの長期間に渡るタンク内ガス圧力の挙動予測や蒸発量予測、また、管路系流体解析における境界条件として使用するためには集中定数系のモデルも検討されている。

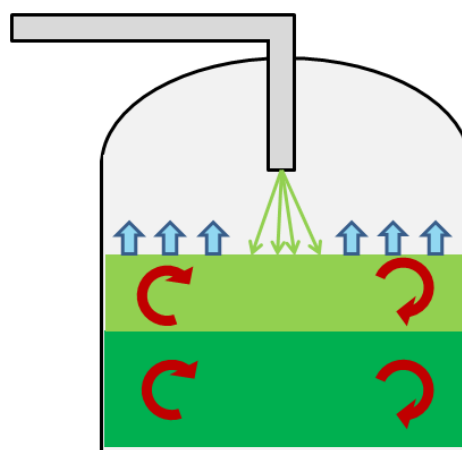


図 4 LNG 貯蔵タンクイメージ

3.4.2. LNG の気化

LNG を気化する場合、海水がよく用いられる。LNG は約マイナス 160℃ で貯蔵されていたため、海水 (0℃～30℃) は熱源となる。気化器のイメージを図 5 に表示する。

気化器は都市ガス消費時間 (昼間) には稼働しているが、夜間は運転していないことがある。この間に気化器中の LNG 液面から LNG の構成成分の蒸発が起こり、気化器内には分子量の大きい成分がガスとして多く溜まっている。翌日に運転を開始するときこの溜まっているガスが熱量に影響を与えることがあり、熱量管理のためのさまざまな工夫がなされている。

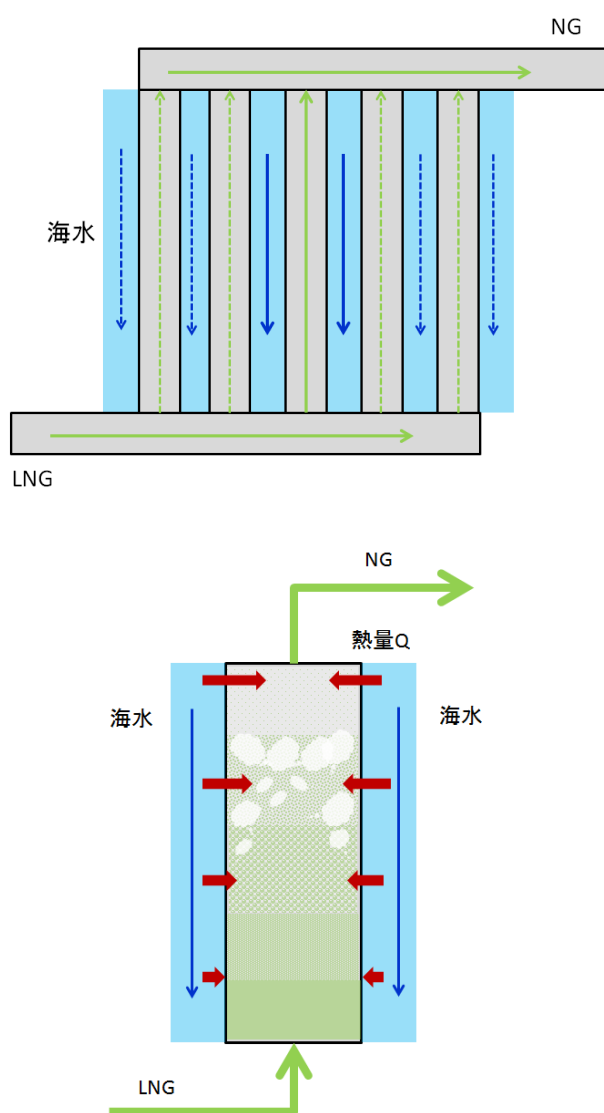


図 5 気化器イメージ
(上：気化器全体、下：管一本拡大)

気化器の詳細シミュレーションは 3 次元流体解

析や気液 2 相流の管路系流体解析が有効である。アドバンスソフト株式会社では、特に、管路系流体解析時にガス側の境界条件として使用するための集中定数モデルについて検討中であり、これらの結果はまた別の機会を設けてアドバンスシミュレーション上で紹介したい。

3.5. 天然ガスの利用 (都市ガス、カロリー調整、臭気、ページ)

気化器によってガスの状態に戻された天然ガスは、日本国内では都市ガスや火力発電用燃料として使用される。その比率は 35:65 である[1]。都市ガスとして利用する場合、安全のために付臭剤を添加し、臭いによってガス漏れが分かるようにし、さらに熱量を調整したのちに各家庭へと運ばれる。図 6 は日本の火力発電所の位置[12]を示している。図 3 と図 6 より、LNG 基地と火力発電所は近くに立地していることが分かる。

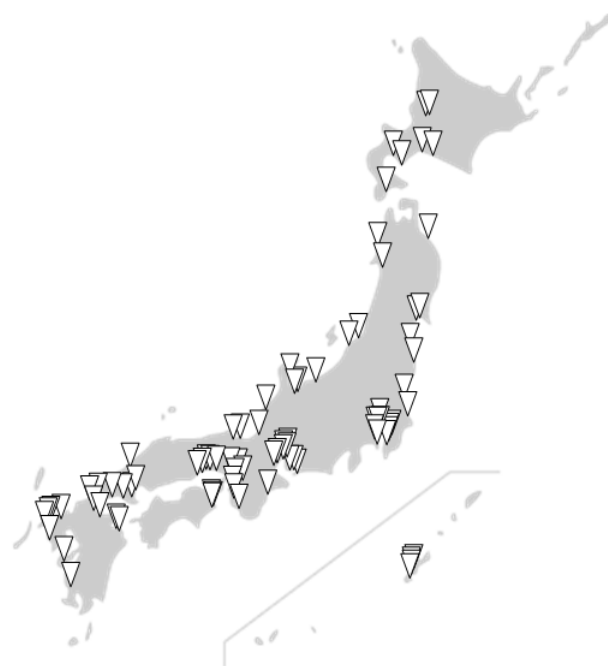


図 6 日本の火力発電所

図 7 に国内の天然ガスパイプラインの整備状況を示す[13]。図 3 と図 7 より LNG 受け入れ基地から大都市圏へガスを輸送するためのパイプラインが整備されつつあることが分かる。

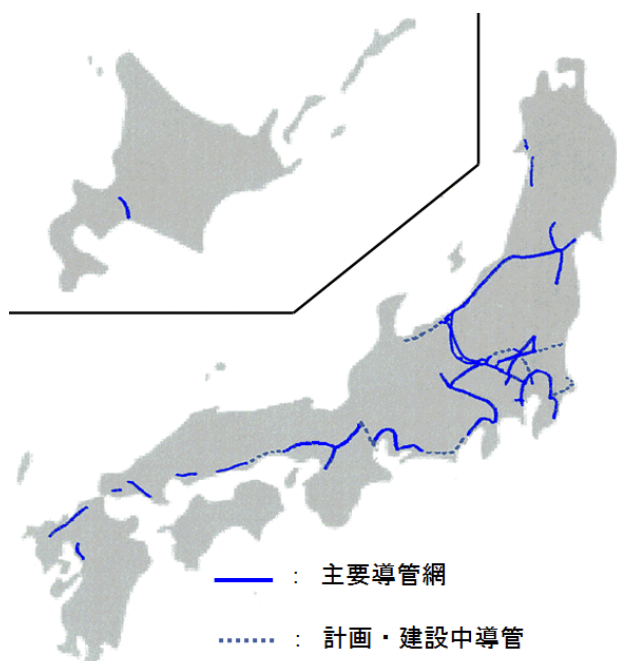


図 7 天然ガスインフラの整備状況

長距離パイプラインとしては、国際石油開発帝石株式会社の新潟～東京ライン[14]がある(図 8)。また、最近(2013 年 9 月)では中部電力株式会社と東邦ガス株式会社が共同で運用する伊勢湾横断ガスパイプライン[15]が敷設されるなどしており、ガスの安定供給のための整備がいっそう進められている(図 9)。

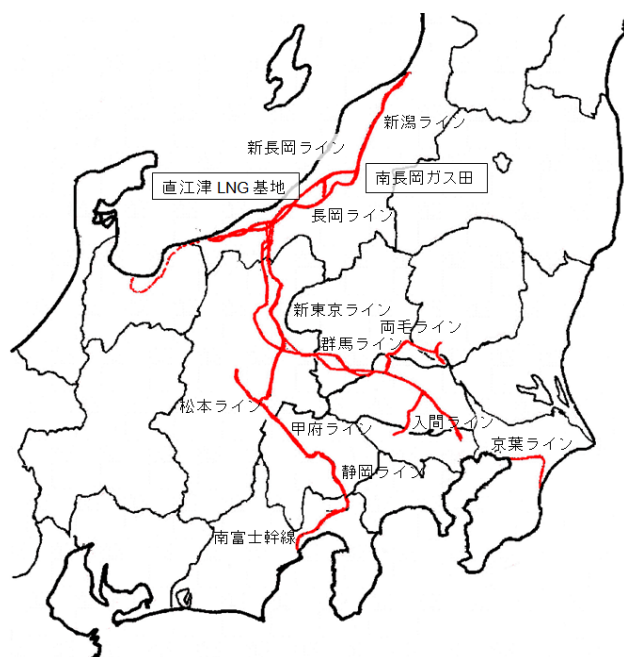


図 8 新潟～東京パイプライン



図 9 伊勢湾横断ガスパイプライン

都市ガス管路系では、管路の保守や改良時に、その中を流れる都市ガスを空気や窒素ガスに置き換える「パージ」と呼ばれる作業が行われる。パージ解析については次章にて紹介する。

4. 天然ガスと数値シミュレーション

4.1. Advance/FrontNet/「による都市ガスパー 解析事例

アドバンスソフトで開発している管路系流体解析ソフトウェア Advance/FrontNet/Γ 2.0 では、理想気体の混合ガスモデルが導入されている。ここでは、ガスは瞬時に混ざるものとして、各ガス成分の流速は混合ガスの流速と等しいことを仮定する。物性は各成分のモル質量、定圧比熱、粘性、圧縮係数を基に、混合ガスの平均物性を粘性係数に対しては Sutherland-Wassiljewa の式を適用し、その他については質量分率平均あるいはモル分率平均を用いて算出している。

図 10 は Advance/FrontNet/Γ 2.0 による管路系モデルである。2000m の管にメタンが入っている。ある時刻から窒素を入れていき、管内のメタンを窒素に置き換える解析を行う。上流側の Vol.1 では窒素の流量指定境界とする。下流側の Vol.3 では圧力指定境界条件とする。計算条件を表 2 に示す。

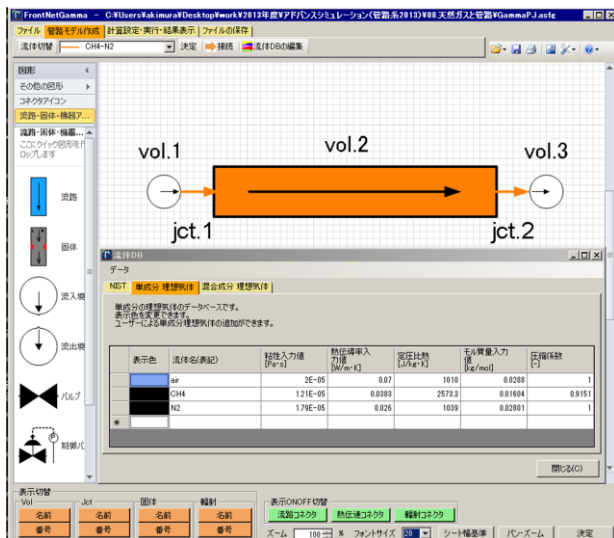


図 10 管路系モデル

表 2 計算条件

項目	数値等
流入側境界条件	窒素 0.5kg/s の 流量指定条件
流出側境界条件	101325Pa[abs]大気圧 の圧力指定境界条件
温度	300K
配管形状	長さ 2000m、直径 20cm
初期条件	管内がメタン 100%で 満たされている。

計算は 200s に対して実施した。計算メッシュは 10m 刻みとした。上流側から 100m, 500m, 1000m, 1500m, 1900m の位置のメッシュの時系列物理量を出力した。

図 11 は各位置での質量流量の時間変化を表している。初めは動いていなかったメタンが窒素の押し込みによって流速を持ち、窒素に置換されて上流側の指定質量流量値 0.5kg/s に達する様子が分かる。

図 12 に時刻約 100s での管内のメタンおよび窒素分布を示す。この時刻では、600m の厚さで混合ガス相が動いていることが分かる。図 11 の時間 100s では位置 1500m と 1900m が質量流量 0.3kg/s となっているが、これは位置 1500m は 600m の厚さの界面内にあり、窒素が全て届いて

いないことを表している。位置 1900m においてはもともとあったメタンの質量流量が 0.3kg/s となっている。

図 13 は各位置でのメタンの質量分率の時間変化である。上流側から窒素がページされ、徐々にメタンの質量分率が 1 から 0 に近づくことが分かる。ページが終了したのは、ページ開始から約 180s 後であった。

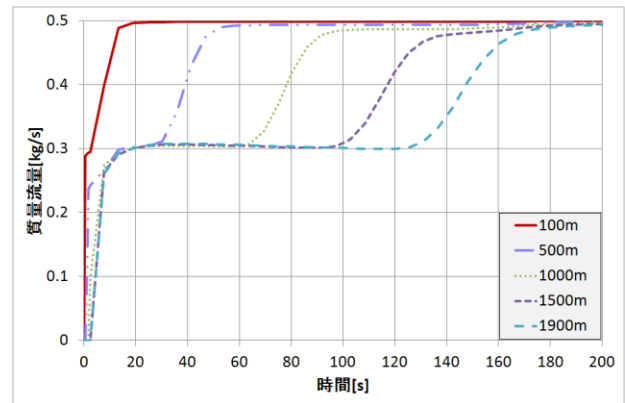


図 11 計算結果 (各位置での質量流量)

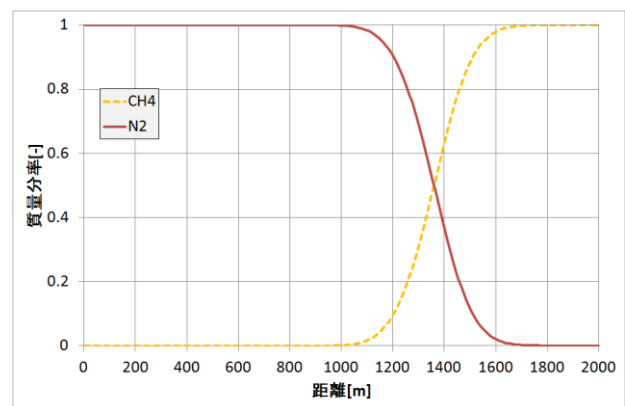


図 12 時刻約 100s での質量分率分布

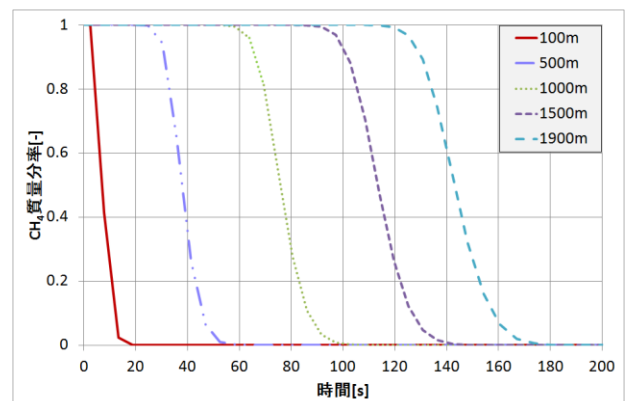


図 13 計算結果 (各位置でのメタン量)

手計算によって簡単な見積もりを行う。窒素の密度は大気圧、300K で 1.14kg/m^3 、配管面積は 0.0314m^2 であるため、流速は約 14m/s である。これより、ページにかかる時間を見積もると $t=2000/14=143\text{s}$ となる。本計算では流入側の圧力は一定ではなく、圧力損失によって変化し、流入部圧力は 118400Pa 、密度は 1.33kg/m^3 、流速は約 12m/s となった。これより、ページにかかる時間を見積もると $t=2000/12=167\text{s}$ となる。図 11 から質量流量は徐々に 0.5kg/s に至ることから、手計算よりもページ完了時間は長いことが分かる。以上から、数値計算は妥当な結果を示しているといえる。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁ウェブページ,
“日本のエネルギー2010”
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-in-japan/energy2010.pdf>
- [2] ウィキペディア “天然ガス”,
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%A9%E7%84%B6%E3%82%AC%E3%82%B9>
- [3] 日本ガス協会ウェブページ,
<http://www.gas.or.jp/user/market/trade/index.html>
- [4] 天然ガス鉱業会ウェブページ,
<http://www.tengas.gr.jp/natural-gas.html>
- [5] 社団法人 日本ガス協会、都市ガス工業概要
(基礎理論編)
- [6] 千代田化工建設株式会社ウェブページ,
<http://www.chiyoda-corp.com/technology/ln g/liquefaction.html>
- [7] ダイヤモンド・ガス・オペレーション株式会社ウェブページ,
<http://www.dgoweb.com/contents/energy/about/>
- [8] 東京ガス株式会社ウェブページ,
<http://www.tokyo-gas.co.jp/Press/20090414-01.html>
- [9] 三井物産株式会社ウェブページ,
<http://www.mitsui.com/jp/ja/sogoshosha/vol>

1/page10.html

- [10] Google マップ,
<https://maps.google.co.jp/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport%3Farticle%3D%25E6%2597%25A5%25E6%259C%25AC%25E3%2581%25AELNG%25E5%259F%25BA%25E5%259C%25B0%25E4%25B8%2580%25E8%25A6%25A7%26project%3Dja>
- [11] 小山和夫, “シミュレーション技術がリスクを極小化し異種 LNG 混合貯蔵のメリットを生かす”, 石油・天然ガスレビュー,
http://oilgas-info.jogmec.go.jp/pdf/1/1898/200801_027a.pdf
- [12] 日本の発電所,
http://map.ultra-zone.net/japan_power_plant を一部加工
- [13] 経済産業省資料, “我が国の天然ガス及びその供給基盤の現状と課題”,
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/gas_infra/001_06_00.pdf
- [14] 国際石油開発帝石株式会社ウェブページ,
<http://www.inpex.co.jp/business/japan/pipeline.html>
- [15] 東邦ガスウェブページ,
http://www.tohogas.co.jp/corporate-n/press/1191553_1342.html
(ウェブアドレスは 2013 年 10 月末時点)

※技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、【カラー版】がダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)