

LNG 受入基地におけるタンク運用管理最適化手法の開発

Development of Optimum Operation Method for Tank on LNG Receiving Terminal

機械事業本部 朝 川 春 馬^{*1}

技 術 本 部 河 野 進^{*2} 竹 下 和 子^{*3}

新 家 利 彦^{*3}

日本海エル・エヌ・ジー株式会社 長 谷 川 辰 也^{*4}

日本海エル・エヌ・ジー(株)新潟受入基地では液化天然ガス(以下、LNGと称す)を海外からLNG船で輸送し受入れた後気化させ、都市ガスや発電所用燃料ガスとして供給している。LNG船からLNGを受入れ、需要に応じて払出しをするLNG貯蔵タンクを効率良く運用するために最適化手法を適用し、適正なレベルに管理しつつ運転コストを削減する手法を開発した。解法として動的計画法を採用し、最適問題を3回に分けて解く工夫により、計算時間を大幅に削減でき、実用的な計算時間に収めることができた。本手法により長期の運用予想が可能となり、運転員へのガイダンスや運用計画に利用されている。

We developed optimization providing efficient tank operation guidance on LNG receiving from cargo ships and on discharge consumption demand for LNG storage tanks at the Nihonkai LNG Co., Ltd., Niigata Receiving Terminal. The storage tank level has been suitably maintained and operation cost cut. Dynamic programming (DP) is applied to solve the optimization problem in 3 steps, greatly reducing calculation time. This system enables us to estimate long-term scheduling and is used for operator guidance and operations planning.

1. ま え が き

LNG受入基地では液化天然ガス(以下、LNGと称す)を海外からLNG専用船で輸送し、LNG専用船内カーゴポンプで荷揚げしLNGタンクに貯蔵した後、ガス化して都市ガスや発電所用燃料ガスとして供給している。

受入設備においては、気象条件の影響による配船計画の変更や季節変動に伴う需要変動などに対応して、過不足なく安定した供給ができる貯蔵タンク運用が不可欠である。また近年のLNG需要増加に対応すべく、複数産地からLNGを受入れることが多くなっている。この場合、LNG密度の違いから産出地によっては貯蔵タンクを分けて受入れる必要がある。

これら様々な条件を予測して計画するタンク運用の管理は複雑となり、効率的な運用を運転員の経験則だけで図ることは困難である。

当社では日本海エル・エヌ・ジー(株)と共同で最適化手法を適用したLNG受入基地タンク運用計画システムを開発した。今回対象とした日本海エル・エヌ・ジー(株)新潟受入基地の貯蔵タンクはLNG船からLNGを受入れる受入タンクと、受入タンクからの移送により受入れをする移送タンクから成る。

運転操作として受入タンクへの受入れと、需要要求に応じた全タンクからの払出し及び受入タンクから移送タンクへのタンク間移送がある。

この設備の効率的運用は、“与えられた配船計画と需要予測に対し、ポンプ能力などの機器能力や異種LNG混合はしないなどの制約を考慮しながら、各タンクレベルを適正に管理しつつ、移送量が最小となる各タンク受入、払出比率を決定する最適化問題を解く”と捕えることができる。

本システムは解法として動的計画法を採用している。本報ではLNGタンク運用管理最適化の適用に際しての運用方法の定式化と適用例について紹介する。

2. LNG 受入基地設備の概要

図1に日本海エル・エヌ・ジー(株)新潟受入基地設備概念図を示す。当基地の特徴については参考文献(1)を参照されたい。

当基地の貯蔵設備は6基の受入タンクと、2基の移送タンクから構成されている。当基地タンクの貯蔵設備概要を表1に示す。貯蔵タンクからLNGポンプで払出されたLNGは、気化器(ORV: Open Rack Vaporizer)で気化され、ガスタービンコンバインドサイクル発電用の燃料及び都市ガス用等として供給される。

貯蔵タンクは地上式タンクで、受入方式としてボトムフィードとトップフィードがある。当基地では受入タンクにはボトムフィードで受入れ、移送タンクはボトムフィードとトップフィードの切替えが可能となっている。貯蔵タンクに蓄えられたLNGは需要に応じてすべてのタンクから払出しができる。

貯蔵タンク内ではLNG密度差に起因してLNG層状化が起きたとき、経時変化により上層と下層が逆転する不安定現象(ロールオーバー)が発生し、大量にLNGがガス化(BOG: Boil Off Gas)し、タンク内圧が急激に上昇する恐れがある。現在、当基地が受入れするLNG産出地はI産、M産、Q産の3種類があり、密度の異なる異産地LNG受入れに対するロールオーバー防止対策として次に示す運用で対応している。

受入タンクはボトムフィードで受入れをするため、重質のM産、Q産LNGは専用タンクで固定して受入れ、異種混合をしない方法を採用している。またI産LNGは他の2種LNGと比べて軽質であるためにタンク内で混合可能であり、6基の受入タンクすべてで受入れ可能である。一方、移送タンクはボトムフィード又はトップフィードで切替えができるためにタンク内混合可能で、すべての受入タンクからの移送が可能である。また移送タンクに対しては、受入タンクから最小限流量(煮詰り防止流量)の移送とそれと同量の移送タンクからの払出しを常時行う操作により、タンク内のLNGの組成変化を防止している。

*1 化学プラント技術センタープロジェクト部主査

*4 技術部技術課副長

*2 広島研究所制御システム研究室主務 工博

*3 広島研究所制御システム研究室

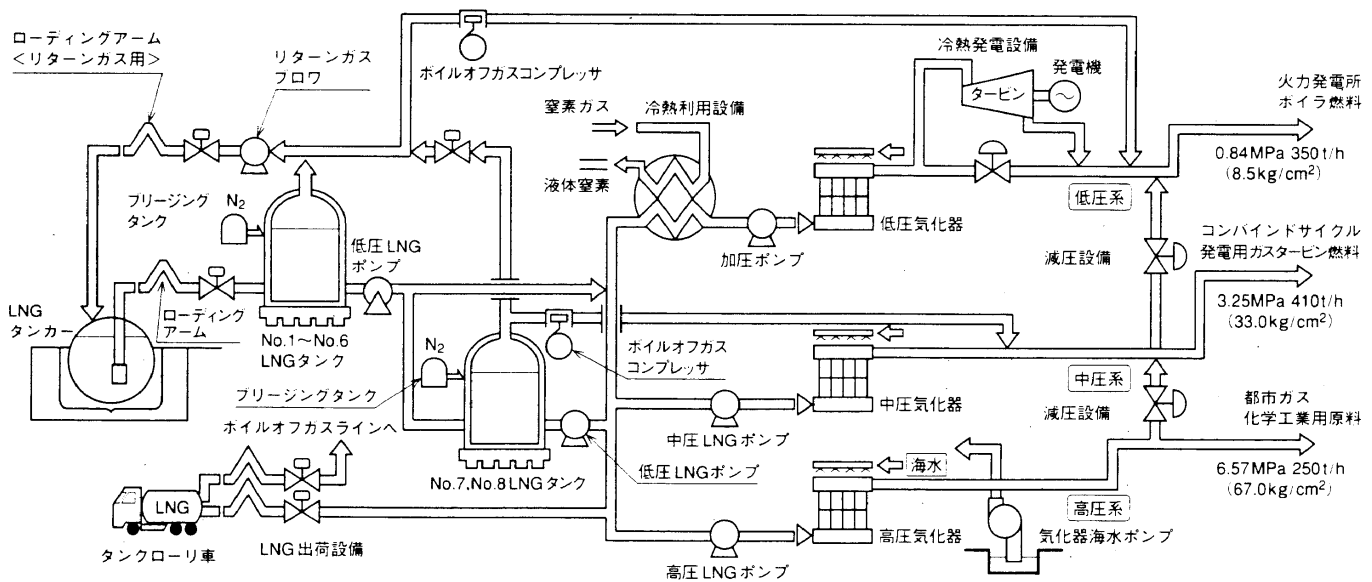


図1 日本海エル・エヌ・ジー(株)新潟受入基地設備概念図 受入基地の受入れ・貯蔵・供給の設備全体の構成を示す。
Schematic Niigata LNG receiving terminal, Nihonkai LNG Co., Ltd.

表1 貯蔵設備概要
Schematic LNG storage equipment

区分	設備名称	能力	数量
貯蔵設備	LNG受入タンク	10万kℓ	2基
		8万kℓ	4基
	LNG移送タンク	10万kℓ	2基
払出設備	LNGポンプ	120t/h	22台 (受入れ18台/移送4台)
LNG船	LNG産地		入船回数
	I産地		約55船/y
	M産地	約125,000m³	約9船/y
	Q産地		約10船/y

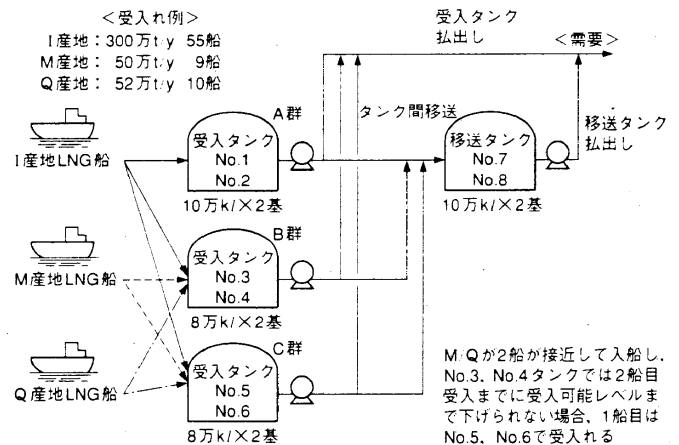


図2 受入基地モデル モデル対象とした貯蔵タンクの受入れ、払出し、移送の模式図を示す。
Receiving terminal model

3. 最適化問題の定義

3.1 運用問題

図2に対象とする受入基地モデルを示す。日々の配船計画(受入量とLNG産地)と需要予測量及び各タンク貯残量の初期値が与えられているとき、タンク貯残量を適正に維持し、払出/移送のポンプ能力や異産地LNG混合受入れをしないなどの制約条件の下に、液レベルの均一化や操作量平準化などを図った運用予想をする。操作量としては各タンク受入比率/払出比率及び受入タンクから移送タンクへの移送量があり、移送量を最小にしかつ移送タンクからの払出量も最小にすることが運転コスト最小化を図った運用となる。タンク運用操作の一覧を表2に示す。

なお、ここで紹介するタンク運用計画に関しては、実運用に合わせて受入タンク6基を2基ずつのA、B、C群の3群と移送タンク2基を1群に分け、タンク群として取扱う。同じタンク群内での個々のタンクレベルや操作量は同一としてモデル化した。

3.2 取扱い変数の量子化

解法上のアルゴリズムの制約から図3のタンク離散化モデルに示すように変数(タンク貯残量、受入れ・払出量・移送量など)はすべて実数を量子化単位(10⁴kℓ/d)でメッシュ分割し、量子化した数値(量子化単位の整数倍)で扱う。時間の単位は1dとし、1日始めのタンク貯残量と、その日の操作(受入/払出/移

表2 タンク運用操作
Tank operation for application

操作種類	運用方法
(1) 受入操作	- M産地、Q産地LNGは受入前日までに専用タンクレベルを目標レベルまで下げて、専用タンクで全量受入れる。 - I産地LNGはすべての受入タンクで受入れ可能。 - I産地受入時にタンクレベル均一化。
(2) 払出操作	- 受入タンク払出しに対応できない場合に限り移送タンクから払出す。 - 移送タンクからの払出し必要最小限(運用コスト最小化)。 - 払出ポンプ能力の範囲内(最大払出量)。 - 受入タンク払出量の平準化。
(3) 移送操作	- 必要最小限の移送(運用コスト最小化)。 - 移送ポンプ能力の範囲内(最大移送量)。 - 移送タンクからの払出しと移送は同時にしない。

送)により1日終りの各タンク貯残量が決まる。一日の中での受入/払出/移送の操作順序の区別はしないで同時に操作が行われるものとする。

量子化単位(Δ)は最小操作量である煮詰り防止流量を基準に、運用上の誤差が生じないようにさらに細分化している。

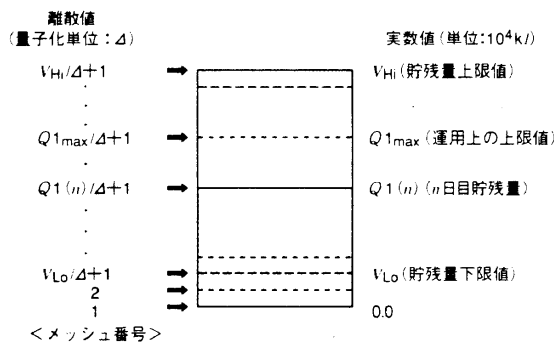


図3 タンク離散化モデル 貯蔵タンク容量を高さ方向にメッシュ分割し量子化した。
Tank mesh model

3.3 タンク運用方法の定式化

本問題の最適化条件は、移送タンクからの払出量と移送量を最小限にし、受入タンクに対してはできるだけ液レベル均一化や操作量平準化をするもので、以下に示す式(1)の評価関数 J を最小とする解を求めることになる。

$$J = \sum_{n=1}^{NDAYS} \sum_{i=1}^3 \{ w_1 (V_{n,i} - V_{n,i}^*)^2 + w_2 (u_{x,n,i} - u_{x,n,i}^*)^2 \} + \sum_{n=1}^{NDAYS} w_M (T_n + u_{y,n}) \quad (1)$$

ここで、

- $V_{n,i}$: 受入タンク群貯残量
- $V_{n,i}^*$: 目標貯残量 (液レベル均一化)
- $u_{x,n,i}$: 受入タンク群操作量 (受入量/払出量/移送量)
- $u_{x,n,i}^*$: 目標操作量 (操作量の平準化)
- w_1 : 液レベル均一化に対する重み係数
- w_2 : 操作量平準化に対する重み係数
- T_n : 移送量 (受入タンク→移送タンク)
- $u_{y,n}$: 移送タンク群払出量
- w_M : 運転コストに対する重み係数
- i : 受入タンク群番号
- n : 日 (d)
- $NDAYS$: 計画日数 (d)

ここで式(1)に示す最初の2項の2乗和は受入タンクに関する評価で、受入タンク貯残量や操作量が目標値に近いほど評価値が小さくなる。タンク貯残量の目標値はその日のすべての受入タンクレベルが均一となる貯残量を設定する。目標操作量はその日の受入タンクのポンプ能力比率から決まる。第3項は運用コストにかかる項で、移送量と移送タンクから払出しが少ないほど省エネルギーを図った運用となるため、初めの2項よりは優先度が高くな

るように重み係数を調整する。

3.4 制約条件

以下に示す制約条件を満たすことは必須で、これら条件をペナルティとして式(1)のコスト関数に含め、制約違反した場合は、多大なペナルティをコストに付加する。

- (1) 受入・移送タンクがあふれたり空になったりしない (タンク容量上限値/下限値の設定)。
- (2) 異産地混合を避けるために、異産地 LNG は専用タンクで受入れ、受入れ前日までに専用タンク貯残量を基準レベルまで下げ空きスペースを作る。これは見掛け上、タンク容量上限値を下げることで対応する。
- (3) LNG ポンプ能力を超えた操作はしない (受入・移送タンク最大払出量や最大移送量を設定)。
- (4) 煮詰り防止の目的以外に、移送タンクへの移送と同時に移送タンクからの払出しは無駄な操作となるので行わない。煮詰り防止の運用条件の考慮は、移送ポンプと移送タンクからの払出ポンプの能力を、煮詰り防止流量分だけ下げることで対応した。

4. 動的計画法の適用

動的計画法 (DP 法: Dynamic Programming) の特徴は離散事象の問題の解法に適し、厳密に最適解が求められるといった利点があるため、今回の最適化の解法に採用した。

DP 法による最適解を求める手順については参考文献(2)を参照されたい。

4.1 計算量低減のための段階的最適化への変換

DP 法は離散事象の最適化には有効であるが、種々の初期状態における状態の結果の記憶と、すべての状態量と操作変数に対する試行回数が必要となり、膨大な計算量とメモリの犠牲を払うことになる。これらを節約する目的で、問題を3段階に分けて処理を分散させ段階的に計算している。

元来、タンク運用の問題は状態変数が4個 (受入れタンク3群と移送タンク1群のタンクレベル) であるが、受入基地への受入量が境界条件として与えられているために、4個の状態変数のうち3個が既知となれば残り1個は物質収支式から決まってくる。これで実際の解空間を1次元下げることができる。さらに最適化演算を下記のように3段階に分けると各段階での状態変数は2個ずつになり、解空間は1次元で取扱えることになる。そこで図4に示すフローのように問題を3段階に分けて処理する。

第1段階: 受入タンク群 (A+B+C) 合計と移送タンク群

第2段階: 受入タンク B 群と受入タンク (A+C) 群合計

第3段階: 受入タンク A 群と受入タンク C 群

従来の問題を一度で解く場合の計算量は、タンクメッシュ数を

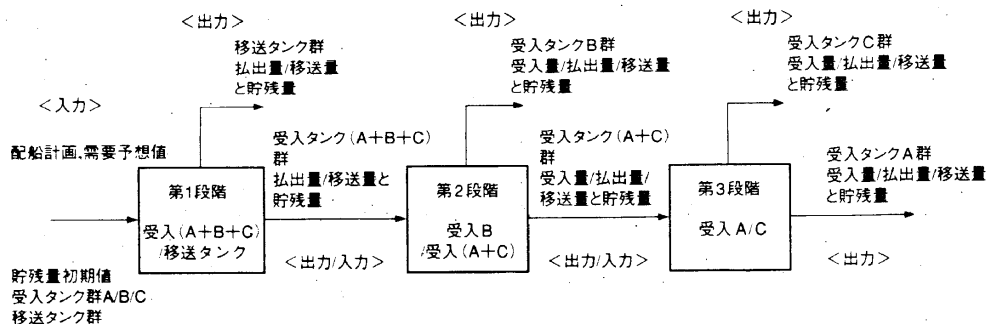


図4 段階分け処理フロー 段階的処理をしたときの各段階での状態量と入出力データの関係を表す。
Distributive transaction flow

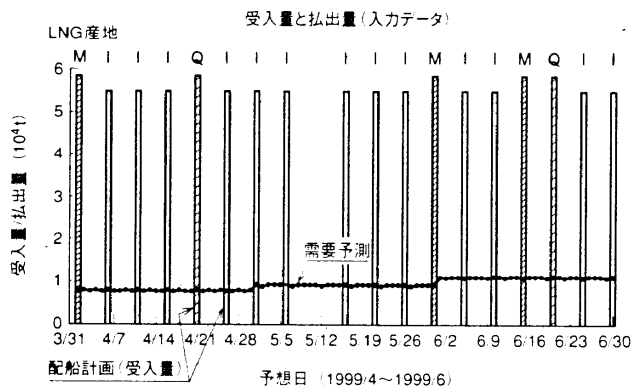


図5 配船計画と需要予測 3箇月間の日ごとの運用計画で、棒グラフはLNG 船入船日、受入量及びLNG 産地を、折れ線グラフは需要予測を示す。
Ship assignment plan and demand estimation

Mesh, 各払出移送の操作量メッシュ数 Mu とすると、操作変数は受入タンク3群に対しそれぞれ払出量と移送量の6個から、各日の試行錯誤の数は $Mesh^3 \times Mu^6$ になる。

段階分けした1次元の問題に対し、各操作量メッシュでの計算をした場合の計算量は概略以下になる。

第1段階: $Mesh \times Mu^2$

第2段階: $Mesh \times Mu^2$

第3段階: $Mesh \times Mu^2$

合計計算量は $Mesh \times (Mu^2 + Mu^2 + Mu^2)$ となる。従来方法に比べて段階的に解くことで計算量は、 $3 / (Mesh^2 \times Mu^4)$ に下げられ計算量を大幅に削減でき、実用的な計算時間に収めることができた。

4.2 異産地 LNG 受入れ条件の設定

M産及びQ産受入れに際しては、専用タンクの貯残量を受入れ可能レベルまで下げて専用タンクで集中して受入れる条件がある。

段階的に分けて処理する第1段階では、受入タンクをまとめて解くため、この異産地受入れ時の条件を実現するためには、第1段階から各タンクレベルを予測した上下限の設定が必要となる。まとめたタンク容量の上下限は各タンクの物理的な上下限の合計で設定することになる。M産及びQ産受入れ前後での専用タンクでのレベルを予測した上下限の設定を次に述べる。

専用タンク上限値は、M産及びQ産受入れ前日に受入れ可能レベルまで下げ、受入れ前日から順次さかのぼって毎日の払出量と払出/移送ポンプ能力のこう配で容量上限まで上げていく。専用タンク下限値は受入れ日に、容量下限値から受入量まで引上げ、その後は容量下限値まで下げていく。下限値のこう配も毎日の払出量と払出/移送ポンプ能力から決まる。

5. 適用例

図5に示す配船計画と需要予想を基に計画期間3箇月間のタン

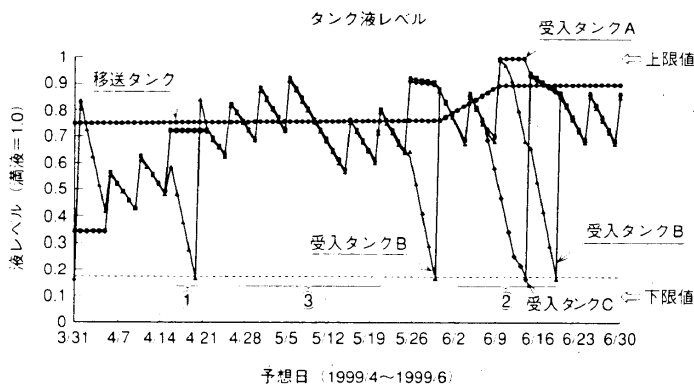


図6 タンクレベル経時変化 受入タンク群A、B、Cと移送タンク群レベルの経時変化を示す。
Tank level trend graph

ク運用を予想した。図6には計算結果例としてタンク群貯残量(液レベル)の経時変化を示す。試行回数は約15万回、計算時間は約5分程度であった(Pentium プロセッサ166MHz)。

図6中に示した番号に沿って以下に説明する。

- ① 4月21日にQ産からのLNGを受入れるために、入船までに専用タンクB群からの払出量を増やし、受入れ可能なレベルまで貯残量を下げている。
- ② 6月15日と6月20日にM産、Q産が接近して連続入船するために、専用タンクB、C群の液レベルを下けている。この受入れを可能にすべく、受入タンクでは空きスペースを確保するために移送タンクへ移送が行われている。
- ③ 4月26日から5月21日の期間のI産入船時ではできるだけ液レベル均一化が図られている。

6. む す び

LNG受入設備でのタンク運用計画に動的計画法による最適化手法を適用することで、省エネルギーが図られるとともに人では困難な長期間の運用予想や運用可否の検討が容易となった。また本システムは日々運転員へのガイダンス及び運用計画を行う運用支援システムに搭載され、現在有効に活用されている。

参 考 文 献

- (1) 吉田ほか、日本海エル・エヌ・ジー(株)LNG新潟基地の特徴、三菱重工技報 Vol.21 No.2 (1984) p.133
- (2) 自動制御ハンドブック(機器・応用編)、計測自動制御学会編