

LNG 基地操業オペレーション最適化を 題材としたソフトウェア活用例

中井 洋平

OR 技術を企業での業務課題に活かすためには、技術的課題の解決だけでなく、検討フェーズや業務の実運用体系に応じたソフトウェアの選定は大変重要である。本稿ではその具体例として、東京ガスでの LNG 基地操業における配船・タンクオペレーション最適化を題材に技術的課題に対する解決方法、および基礎検討から実運用のためのシステム開発に至る企業内での検討プロセスやソフトウェア活用例について紹介する。

キーワード：最適化、数理計画、ガス、基地操業、ソフトウェア

1. はじめに

東京ガスは、主に首都圏を営業区とするガス事業者であり、LNG (Liquefied Natural Gas: 液化天然ガス) を海外から輸入し気化することで都市ガスや発電用ガスを約 1,100 万件のお客様に対して供給している。当社では 40 年以上の長きにわたり、LNG 調達から都市ガス製造、供給、販売・エネルギーサービスに至るガス事業のバリューチェーン全体に対し、数理最適化、シミュレーション、統計解析、予測、データマイニング、金融工学といったさまざまな数理技術、OR 技術を活用してきた。このような技術を業務課題に活かすためには、目的や検討フェーズ、業務体系に応じたソフトウェアの活用が大変重要であるが、本稿ではその具体例として、当社での LNG 基地操業における配船・タンク繰りオペレーションの最適化のための OR 技術の適用を題材とし、技術的課題の解決方法、および基礎検討から実運用のためのシステム開発に至る企業内での検討プロセスやソフトウェアの活用について紹介する。

2. 基地操業概要

当社の基地操業では、都市ガスの原料となる LNG を受入れてから、各需要家にガスを送出するまで、タンクに貯蔵後、熱量調整を行い送出する、といったプロセスを経る。

原料となる LNG はマレーシアやブルネイ、オーストラリア、アメリカ（アラスカ）、カタールなどといった世界各国から船舶に積まれ当社の基地に受入れられているが、産地によってガス構成比率（メタン、エタ

ンなどの構成比率）が異なっており、 m^3 当たりの熱量 (MJ [メガジュール]) が複数種類存在する ($40 \sim 45.5 \text{ MJ/m}^3$ 程度)。当社で受入れる LNG 船の隻数は、年間約 300 船以上に上り、LNG 船が基地に到着すると、送出まで一時的に各タンクに受入れられる。

基地は根岸、扇島、袖ヶ浦の全部で 3 基地存在（日立基地も今年度稼働開始予定）し、合計約 50 基以上の LNG タンクおよび数基の LPG タンクを所有している。各タンクはそれぞれ役割がある程度定まっており、タンクの構造や性質によって複数の産地の LNG を混合できるタンクや単一の産地の LNG しか受入れられないタンクなどさまざまなものが存在し、受入と送出の制約となる。またタンク内に貯蔵中は絶えず LNG の濃縮が起これ、 m^3 当たりの熱量は上昇していく。

また、タンクからのガスを送出する前に熱量調整を行う。これは日本固有の条件であり、お客さまとの契約上都市ガスの送出熱量は $45 \text{ MJ/m}^3 N$ に調整することが義務づけられている¹。そこで、LNG タンクにてさまざまな熱量の LNG 混合による熱量制御を行っており、 $45 \text{ MJ/m}^3 N$ を下回る LNG については熱量の高い LPG (Liquefied Petroleum Gas: 液化石油ガス) の略称で熱量は 100 MJ/m^3 程度) との混合により送出熱量制約を満たしている。この混合比は m^3 当たり熱量に依存するため、熱量調整の際にどのタンクから LNG を使用するかによって、LNG と LPG の混合比が変化する。さらに、一般的に LPG 単価は LNG 単価よりも高価であり熱量調整に使用する LPG 使用量の削減はコスト削減へと繋がるため、この点も安定供給と同様に操業上重要な観点となる。その他、都市ガ

なかい ようへい
東京ガス株式会社電力事業計画部
〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20

¹ 気体の体積は条件によって異なるため、標準的な条件、1 気圧、温度 0°C 、湿度 0% における気体の体積を $\text{m}^3 N$ で表す。

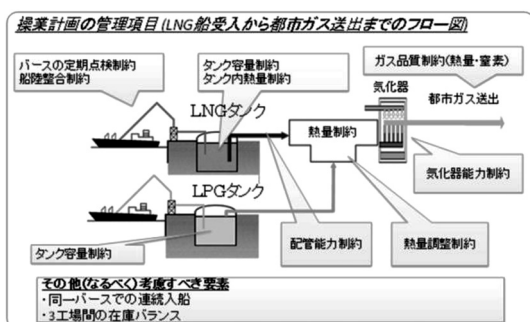


図 1 操業フローと主な管理項目

ス送出までのフロー図と操業上の主な管理項目を図1に示す。

3. モデル概要

3.1 基地操業支援モデル全体概要

前述のように、オペレータはガスの安定供給のためにタンク在庫や熱量調整制約、配管制約、気化器能力制約などのさまざまな条件を考慮しつつ、バース（LNG船が入船する基地の栈橋）への船の割り当てやLNGタンク繰りを行っている。一方で、LNG産地トラブルや天候によるLNG船の到着遅延などにより運航スケジュール変更や都市ガスの需要変動に応じて計画を見直す必要があるが、近年の受入LNGプロジェクトの多様化や低熱量化、需要増や変動幅の増加などの環境変化により年々複雑化しており、操業計画の策定には多大な労力を要している。

そこで、OR技術を活用し、コスト削減だけでなく操業の安定性上重要な観点も勘案することで、実運用に足る年間配船計画および操業計画策定が迅速に可能な最適化モデルの開発を行った。

モデルで考慮している主な入出力や設備制約の概要は表1のようになっている。また、利用者はLNGを調達する原料部や各基地との調整を行う生産部門の計画担当者であり、モデルは各基地への配船案と基地内オペレーション案の作成を対象としている。計画のタイムスパンは年間や半期といった長期を対象としており、各入出力項目は日別のデータとなる。

3.2 モデル化するうえでの技術的課題

基地操業計画策定を数理計画法によりモデル化するにあたっては、大きくは以下のように二点技術的な課題があった。

- 1) 定式化後の問題の複雑性
 - (a) 大規模問題
 - (b) LNG熱量計算の非線形性

表 1 基地操業支援モデル概要

入力	1) プロジェクト別 LNG 受入量・入船日 2) 日別のガス・電力需要 3) 初期条件（タンク在庫，熱量） 4) LNG 船の積載量
設備制約	5) バース・タンク制約 6) タンク間移送・気化器能力制約
出力	7) 入船バース 8) タンク別の受入量・払出量，在庫・熱量推移 9) LPG 使用量

2) 実運用に資する計画案の導出方法

一点目は、定式化後の問題の複雑性である。一般的に数理計画法では整数の変数が多く含まれる大規模問題では求解が困難となる。そこで、一度にすべてをモデル化するのではなく、問題を分割してモデル化する必要がある。また、原料費最小化（LPG 価格 > LNG 価格の場合は、熱量調整用の LPG 使用量の最小化）のためには LPG 使用量を直接目的関数とすることが理想的であるが、正確な熱量の計算式は非線形となり、数理計画法では非線形のモデルは求解が困難となる。このように、大規模かつ複雑な問題では、単純に定式化しただけでは解くことができず、解法を工夫する必要がある。

二点目は、実運用に資する計画案の導出方法である。実運用の解としてはコスト削減以外にも操業リスク管理上さまざまな観点を考慮する必要がある。以下、これらの技術的課題に対する検討内容を具体的に述べる。

3.2.1 1)-(a) 大規模問題への対応

本テーマでの基地操業支援モデルは、数理計画法の MILP（混合整数線形計画法）を使用している。ただし、各基地での個別タンク単位まで含め、すべての基地操業オペレーションを一つの問題として表現すると、約 30,000 の整数変数（LNG 船をどのタンクで受入れるか、また配管の送出先の変更など）を含む 50,000 変数を要する大規模な問題となり求解不可能となる。そこで、図2のように配船・タンク繰りを分割し、第一段階：各基地への配船の決定、第二段階：第一段階の配船に基づき各基地でタンク群でのタンク繰りを計算、という二段階の問題に分割したモデルとした。

まず、第一段階モデルでは各種制約条件を考慮して、2カ月ごとの配船計画を導出し、次の2カ月では決定済みの期間における配船計画は固定させて、次の一定期間の配船計画を導出する。この操作を全期間における配船計画が定まるまで繰り返す。これにより一度に決

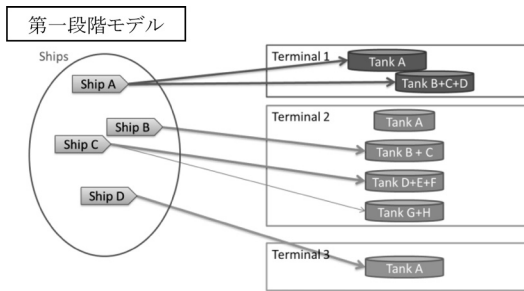


図 2 操業フローと主な管理項目

定する 0-1 整数変数の数の削減が可能となるため、計算時間の削減が期待できる。一方で、分割して最適化を行うため、最終的に得られた最適解が、通年で見た場合の厳密な最適解になる保証はない。また、3 カ月以上の期間単位で計算した場合、計算時間の増加が無視できなかったため、現実的な計算時間で、導出可能な 2 カ月間とした。

3.2.2 1)-(b) LNG 熱量計算の非線形性への対応

モデル化するうえでの技術的課題の二点目が、定式化後の問題の複雑性さらに LNG 熱量計算の非線形性である。数理計画法では定式化したモデルが非線形であると、その求解が非常に困難となる（特に問題が大規模な場合）ため、線形となるようヒューリスティックなルールベースの解法での定式化を行った。

このルールベースの解法の例として、熱量の制御方法を以下に示す。各タンクでの LNG の熱量は、LNG の受入と濃縮により図 3 のように時間が経つにつれ変動する。都市ガスの送出にあたっては $45 \text{ MJ/m}^3 N$ に熱量調整する必要がある、また熱量調整前にそれ以上の熱量となると送出が困難となるため、LNG の濃縮の影響と船の受入やタンク移送による影響を考慮して、タンク内の熱量を一定の熱量範囲に保っておくよう熱量を制御する必要がある。

そこで、次式のように仮想の熱量ポイントを用いることで、タンクの熱量制御を線形で定式化する。具体的には、まず船ごとにその LNG 熱量によって熱量ポ

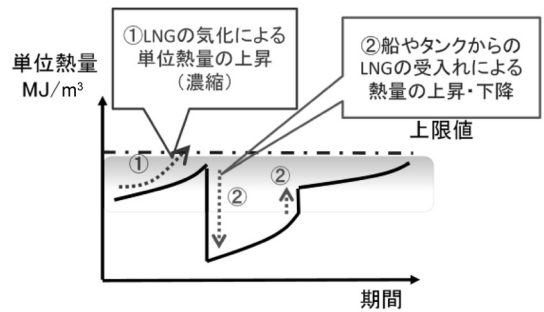


図 3 タンク内での LNG 熱量変動イメージ

イントを設定する。（この熱量ポイントは LNG 産地のプロジェクトごとに、熱量調整に必要となる LPG 使用量を基に設定されている。）次に、タンクごとにおおよその LNG 平均滞留期間が計算可能なため、その期間内に入船する船に対してポイントを加算していく。そして、各タンクで受入可能な熱量の上下限値を設定することで、高熱量（または低熱量）の LNG 船の同一タンクでの連続入船を制限することが可能となる。この熱量ポイントを使用した熱量制御イメージを図 4 に示す。図 4 上図は熱量制御がうまくいっている例、下図は熱量違反の例である。なお、この熱量ポイントはモデルでの計算時のみ使用し、最終的なアウトプットとしては、配船とタンク移送が決定した後に精緻な方法で再計算を行う。

$$TCP_{t,d} = \sum_{d'=d-ART_t}^d \sum_b \sum_s \times SCP_s * V_ShipTank_{s,b,t,d'} \\ \forall t \in Tank, \forall d, d' \in Day \\ s.t. TCP_{t,d}^{min} - P_{t,d}^{cl} \leq TCP_{t,d} \leq TCP_{t,d}^{max} + P_{t,d}^{cu}$$

where

$TCP_{t,d}$: d 日のタンク t における熱量ポイント

SCP_s : 船種 s の熱量ポイント

$V_ShipTank_{s,b,t,d}$: d 日にバース b を通じて、船種 s からタンク t に受入れた LNG 量

ART_t : タンク t の LNG 平均滞留期間

$TCP_{t,d}^{min}, TCP_{t,d}^{max}$: タンク t における $TCP_{t,d}$ 上下限値

$P_{t,d}^{cl} \geq 0$: タンク t における熱量ポイント下限値 $TCP_{t,d}^{min}$ の違反ペナルティ量

$P_{t,d}^{cu} \geq 0$: タンク t における熱量ポイント上限値 $TCP_{t,d}^{max}$ の違反ペナルティ量

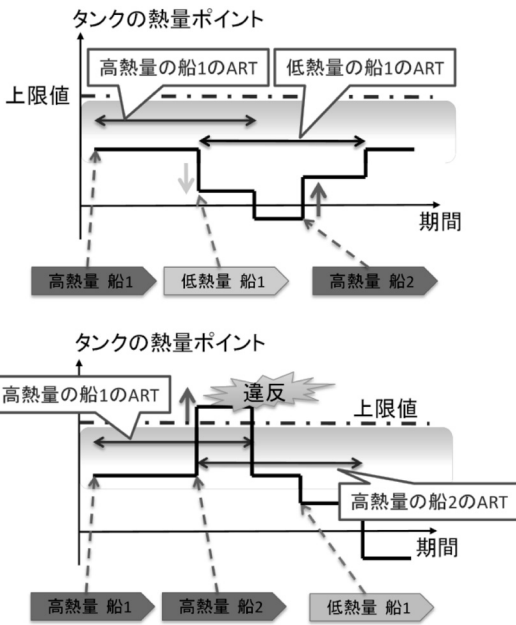


図4 熱量ポイントによる熱量制御

3.2.3 2) 実運用に資する計画案の導出方法検討

技術的課題の三点目が、実運用に資する計画案の導出方法である。数理計画法の特性上、原料費のコスト削減のみを目的関数としてモデル化すると実運用上では作業上のリスクを鑑みて実行しない極端な解（一つの基地のLNG在庫がその他の基地よりも極端に多いなど）が算出されうる。そこで、コスト削減や作業上のリスク管理上考慮したい観点を重み付け、なるべくよい配船パターンをモデルで算出し、その結果を適宜人間が修正することで対応する。この重み付けによる定式化イメージを次式に示す。

Minimize

$$\begin{aligned}
 & W^{pb} * \sum_d \sum_{tm} P_{tm,d}^{pb} + W^{pn} * \sum_d \sum_b P_{b,d}^{pn} \\
 & + W^{tl} * \sum_t \sum_d P_{t,d}^{tl} + W^{tu} * \sum_t \sum_d P_{t,d}^{tu} \\
 & + W^{vu} * \sum_v \sum_d P_{v,d}^{vu} + W^{cl} * \sum_t \sum_d P_{t,d}^{cl} \\
 & + W^{cu} * \sum_t \sum_d P_{t,d}^{cu} - \sum_s \sum_{tm} \{ W_{s,tm}^{sh} * N_{s,tm} \}
 \end{aligned}
 \tag{1} \tag{2} \tag{3} \tag{4} \tag{5} \tag{6} \tag{7} \tag{8}$$

- (1) 一基地での同日複数LNG入船制約
- (2) 連続日のLNG船受入制約
- (3) タンク容量下限値制約
- (4) タンク容量上限値制約

表2 基地操業モデル概要

	人手	モデル
計算時間	2～3日	10～15分
LPG消費量 (人手での結果を1とした場合)	1	0.86

- (5) 気化器能力超過制約
- (6) タンク管理熱量下限値制約
- (7) タンク管理熱量上限値制約
- (8) 特定タンクへの特定液種受入制約

3.3 最適化の効果

ある設備前提条件と計画値にて本モデルを活用した結果と人手にて計画策定した結果との比較を表2に示す。本モデルにより操業制約の順守かつ原料費削減に資する計画案の策定が、人手での2～3日の計算時間に比べ10～15分となり迅速に計算可能となった。また、熱量調整に使用するLPG消費量は人手での結果と比較して約14%減となった。

4. 実運用に向けた検討プロセス

前節では数理計画の技術的課題の解決方法について述べた。本節では、基礎検討から実運用のためのシステム開発に至る企業内での検討プロセスやソフトウェアの活用内容について紹介する。

4.1 基礎検討

本件でのモデル開発の基礎段階においては、Frontline Systems, Inc. の Premium Solver Platform を使用した。これは、数理最適化を求解するエンジンとして Gurobi や XPRESS などの Solver Engine と Excel でのインターフェイスとで構成されたソフトウェアであり、通常のように Excel 関数でモデルを記述した後、意思決定変数や制約条件、目的関数に該当するセルを指定することで、容易に最適化モデルの定義が可能である。

また、企業内の実業務においては Excel が共通言語であり、さまざまなデータ管理や業務は Excel を用いて行われていることが多い。したがって、実オペレーションを行っている部門からの課題の洗い出しや試行錯誤が頻繁に発生する基礎検討段階においては特に Excel を用いたモデル化や情報共有は有用である。

4.2 実運用に向けたシステム開発

基礎検討段階において本課題を解決するための数理最適化モデルの構築とその効果を確認した後は、実運用に向けたシステム開発が必要となる。基礎検討段階で試行錯誤のため活用していた Premium Solver Platform

では、下記のような課題があった。

- ・設備の増設・改変，受入 LNG 液種の追加・変更に対して都度 Excel 数式の書き換えが必要であり，メンテナンスに大きな労力を要する。
- ・基礎検討モデルは属人化された Excel ベースのため，ノウハウの引き継ぎが困難。また，インターフェイスの使い勝手が悪い。

これらの課題を解決するために，(株) NTT データ数理システムと共同検討を実施し，同社の Numerical Optimizer (数理計画のためのモデリング言語，多様な求解アルゴリズム，および GUI 開発環境を備えた汎用数理計画法パッケージ) を用い，メンテナンス性向上のための汎用性の高いアルゴリズムへの改変や，実運用に資するシステム連携やインターフェイスの開発を行った。

具体的には，まず前者については，基礎検討時に使用していた Premium Solver Platform では，Excel でモデルの記述を行うため，一度設備構成や運用条件が変更となると，逐次 Excel のリンク張り替えや数式の書き換えが必要となり，モデルメンテナンスに大変な労力を要していた。そこで，基地やタンクの接続関係などのモデル定義を，より一般化したアルゴリズムへと改良することで，設備変更への対応が容易となり，人為的ミスの低減や前提条件変更時のモデル設定時間の短縮が可能となった。

次に，後者の課題については，各部門間の業務ミッションや実運用体制を考慮しつつ，下記のような点に留意したシステム構築を実施した。

- ・日々の既存業務で使用している Excel とモデル入出力データが連携可能
- ・計画策定時に頻繁に変更する可能性のあるモデルパラメータについては Numerical Optimizer のモデリング言語を直接変更することなく，Excel インターフェイス上にて設定可能
- ・意思決定を左右するモデル出力結果の理解が容易なようグラフなどを付与

例として出力結果のイメージ図を次に示す。図 5 は LNG 船の受入バースを示し，図 6 はタンク別の在庫推移，図 7 は熱量推移のイメージとなる。実運用後の開発システムは，年間計画や将来的な設備検討などに活用されている。

5. まとめ

本稿では，当社での LNG 基地操業における配船・タンクオペレーション最適化を題材に技術的課題に対

	Terminal 1		Terminal 2		Terminal 3
	Berth 1	Berth 1	Berth 2	Berth 3	Berth 1
12/1			Ship Type C	Ship Type D	
12/2		Ship Type B			
12/3	Ship Type A				
12/4					Ship Type H
12/5					
12/6	Ship Type A	Ship Type B		Ship Type G	Not Available
12/7					
12/8		Ship Type B			
12/9					
12/10					
12/11	Ship Type C		Ship Type A	Ship Type B	
12/12					
12/13					
12/14		Ship Type B		Ship Type E	
12/15	Ship Type B		Ship Type F		

図 5 LNG 船の受入バース

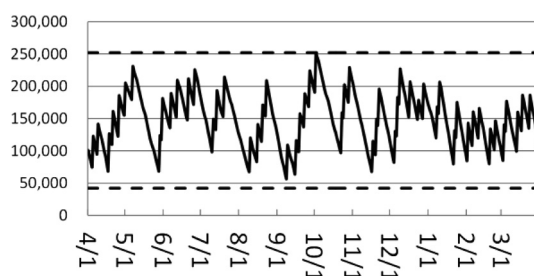


図 6 タンク在庫推移例

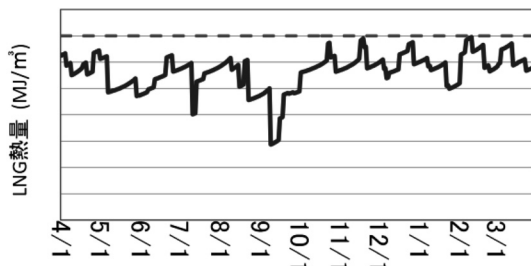


図 7 タンク熱量推移例

する解決方法，および基礎検討から実運用のためのシステム開発に至るまでの企業での検討プロセスやソフトウェア活用例について紹介した。企業の実業務においては万人が使用できる Excel によるデータ管理や業務が行われ，Excel が共通言語となっているといった点に見られるように，OR 技術を業務課題に活かすためには，技術的課題はもちろんのこと，検討フェーズや業務の実運用体系に応じたソフトウェアの選定や活用も大変重要であるといえる。

参考文献

- [1] 特許出願，“受入計画策定方法，及び受入計画策定システム，”(出願番号：特願 2012-26366)