





図3 LNG 出荷設備

が、月の途中でも急な予定変更に対応して、日々配送計画を見直す。配送計画の策定においては、指定日時にお客さまへ LNG を確実に届けることが最も重要である。そのために、ローリー車や乗務員の制約を守りつつ、乗務員の労働時間も気にしながら、計画を立てている。

お客さまが保有する LNG タンクやお客さまの構内道路などの制約で、配送を行うローリー車の車種は限定される。また、お客さまごとに、ローリー車を運転する乗務員についても制約がある場合がある。

## 2.2 基地における積込

ローリー車への LNG の積込は、東京ガスの LNG 基地内にある専用の LNG 出荷設備で行われる(図3)。LNG 出荷設備では、アンローディングアームと呼ばれる可撓性のある金属性の配管で、基地内の LNG 輸送配管からローリー車へ所定量を充填する。

ローリー車への積込は、配送当日の出発前に行う場合と、翌日や翌々日の配送に備えて事前に行う場合がある。ローリー車に積み込まれた LNG は、徐々に気化し、ローリー車内の圧力が高まるため、安全面を考慮して事前の積込は、基本的には翌日分、最大でも翌々日分に制限している。

充填設備の数には限りがあり、1回の充填に1時間程度の時間を要するため、充填スケジュールもローリー車による LNG 販売のロジスティクス最適化には重要な要素となる。

## 2.3 配送、荷下ろし、基地への帰還

積込を終えたローリー車は、お客さまとあらかじめ約束した時刻に合わせて、配送を行う。お客さま先ではローリー車に備え付けられたホースを用いて、お客さまのタンクに LNG を移送する。

LNG をお客さまのタンクに移送したローリー車は、所定の基地に戻る。各々のローリー車は、所属の基地が決まっており、原則は所属基地に戻るが、ほかのローリー車の点検やお客さまからの注文状況によっては、

ほかの基地に移動することもある。また、需要量の多いお客さまには、1日に複数回の配送を行うことがあり、ローリー車がお客さま先と基地を何度か往復することもある。

すべての配送を終えたローリー車は、翌日以降のスケジュールに応じて、積込みを行ってから基地内や所定の場所で待機する。

## 3. モデル

本節では2節で述べた要件を満たす配送計画を求めるための計算のモデルについて説明する。

### 3.1 モデルで考慮している要件

モデルで考慮している要件のうち主なものを以下に挙げる。(※は必須の要件ではなく、最適化問題の目的関数として扱われる。)

- A) 注文の車種に合致する車種で配送する。
- B) 乗り入れ可能な車両と配送先の組み合わせで配送する。
- C) 車両は、各日の開始時と終了時に指定された基地で待機する。
  - 車両がどの基地で待機するかは、最適化の対象ではなく、所与の条件として扱っている。
- D) 各種時間の制限を考慮する。
  - 各日の車両の使用可能時間帯
  - 各日の各基地の LNG 積込設備の使用可能時間帯
  - 基地での LNG 積込にかかる時間
  - 基地-配送先間の移動時間
  - 納品時刻と荷下ろしにかかる時間
- E) 複数回配送の制限を考慮する。
  - ある車両が同日に複数回配送する場合には、すべて同一の配送先への配送とし、かつ最大4回までとする。
- F) 各発注の配送は、その発注で指定された必要台数の車両で行う。 ※
  - 業務上は必要台数で配送することは必須であるが、入力データの不備などにより必要台数での配送計画を立案できないことがある。そのような場合であっても計画を出力するために、要件 F) を制約条件ではなく目的関数としている。
- G) 乗務員の稼働時間をなるべく減らす。 ※
- H) 各日の基地での LNG 積込に使用するレーン数の制限を考慮する。
  - 各基地では、同時に積込を行える車両数が制限される。

- I) 積込の待ち時間の制限を考慮する。
  - 配送に出発する前または配送後に積込を行う際の待ち時間は1時間以下とする。
- J) 乗務員の勤務時間を平準化する。 ※
- K) 各日に乗務員が勤務可能な基地の制限
- L) 各日に乗務員が担当可能な配送先の制限
- M) 各日に乗務員が乗車可能な車両の制限

### 3.2 処理手順

以上の要件を満たす計画を立てるにあたり、本件ではすべての要件を同時に考慮するのではなく、以下の五つの段階に分けて計算を行うこととした。

1. 配送パターン列挙
2. 配送パターン選択
3. 補給パターン列挙
4. 補給パターン割り当て
5. 乗務員割り当て

紙面の都合上すべての処理を説明することができないため、本稿では「配送パターン列挙」と「配送パターン選択」の二つを説明する。

### 3.3 配送パターン列挙

実務規模での「車両と注文の一对多の組合せ」を数理モデルのみで記述することは困難であるので、配送パターンという考え方を導入する。数理モデル外で「配送パターンと注文の一对多の組合せ」を列挙することで、数理モデル内では「車両と配送パターンの一对一の組合せ」の選択に注力できることが配送パターン導入の意義である。

#### 3.3.1 配送パターンとは

- A) 発注で指定された車種での配送
- B) 配送先に乗り入れ可能な車両での配送
- C) 各日の車両の開始時と終了時の指定基地
- D) 配送に関する各種時間の制限
- E) 同一車両による複数回配送は同配送先に限る

などの業務要件を集約し、少なくとも一つのオーダーを含んだ、日付・車両ごとの実行可能な配送方法を列挙したものが配送パターンである。

実行可能な配送方法を考えるため、まずは車両の1日の動きを考えてみる。複数回配送の要件 E) より、同日同車両が複数回配送する際に異なる配送先に配送することはないため、乗り入れる配送先は1カ所、基地は開始時と終了時に指定された1基または2基となるので、車両の1日の動きは次のような状態遷移図で表すことができる(図4)。

車両の1日の動きを具体的に見るため、図5で示すような基地と配送先間での配送パターンについて考

える。車両への積込時間・荷降時間はそれぞれ60分・90分とし、いずれの配送先からのオーダーも表1のように与えられるとする。時間的な制約を考慮しなければ、配送方法は全部で $2^3 - 1 = 7$ (通り)を列挙できるので、ここから時間的な制約を満たせないものを除外した残りを配送パターンとして出力する。

#### 3.3.2 配送パターンの具体例

同日同車両が複数回配送するためには、

$$\begin{aligned} & (\text{配送するオーダーの荷降時間帯の間隔}) \\ & \geq (\text{開始基地への帰庫時間}) + (\text{開始基地での補給時間}) + (\text{配送先までの輸送時間}) \end{aligned}$$

である必要があり、この不等式の右辺は、この例では、配送先Aが140分、配送先Bが260分となる。これらの値を用いて時間的な制約を考慮すると、図6のように表せる。ここで、破線は配送先Bのみが時間的な制約を満たせない箇所である。

図6のパターン1,2の(\*1)の間隔は210分、パターン1,5の(\*2)の間隔は150分なので、配送先Bでは時間的な制約を満たせておらず破線になっている一方、配送先Aでは時間的な制約を満たすので、配送先Aでの配送パターンを列挙するここは実線となる。また、パターン3の(\*3)の間隔はいずれの配送先でも時間的な制約を満たすので実線となる。したがって、配送先Aではパターン1~7の7通りのすべてのパターンを選択できるのに対し、配送先Bではパターン3,4,6,7の4通りの配送パターンから選択することになる。

表1 配送先からのオーダーの例

オーダー番号	荷降時間帯
オーダー1	09:00~10:30
オーダー2	14:00~15:30
オーダー3	18:00~19:30

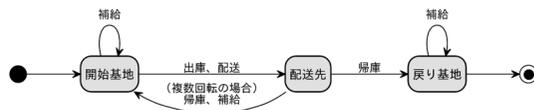


図4 車両の1日の動きの状態遷移図

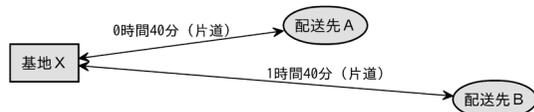


図5 基地-配送先間の移動時間の例

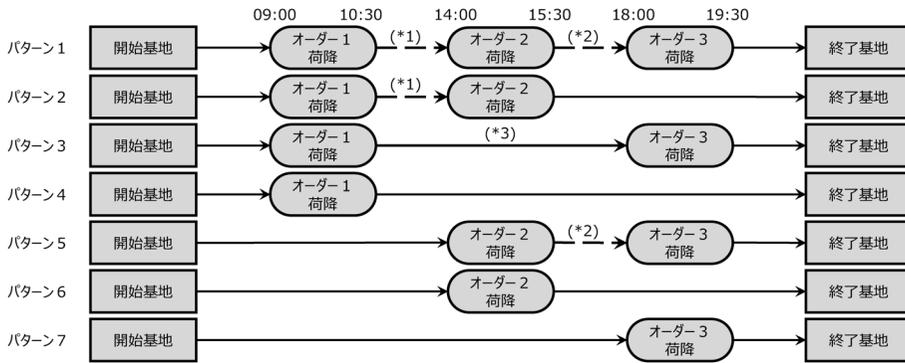


図6 配送パターンの列挙

### 3.3.3 配送パターンの導入によるモデルの簡素化

このように、配送パターンは「出庫から帰庫までの車両の1日の予定案」を表している。配送パターン自体は業務要件として明言されるものではなく、モデル化のための人工物である。

配送パターン導入前後でのモデルの違いを図7に示す。業務要件を素朴に満たそうとすると、図7上のように、「車両」と「注文」からなる2部グラフを考え、業務要件を満たすように枝を選択するのが自然であるが、枝の選択にかかわる制約条件が複雑になってしまう。配送パターンを導入することによって、図7下のように、「車両」と「注文」が「配送パターン」を介して繋がっているグラフで、どの配送パターンを選択するかという問題として考えることができる。配送パターンを選択する際には、

- 各車両に対して、選択されるパターンは高々一つ
- 注文に対して、選択される配送パターンはちょうど一つ

という制約を満たすだけで、要件A)～E)が満たされる。

### 3.4 配送パターン選択

配送パターン選択では、配送パターンを使って最大1カ月分の車両のスケジュールを求める。

#### 3.4.1 配送パターン選択で考慮する要件

要件A)～E)は、配送パターンに集約されたので、配送パターン選択で考慮する要件は以下の二つとなる。  
F) 発注で指定された必要台数分の車両で配送する。

※

G) 車両・乗務員の稼働時間の合計を減らす。 ※

#### 3.4.2 配送パターン選択モデルの定式化

まずは上記要件以外の暗黙の条件の定式化を考える。暗黙の条件とは、「車両は分身しない」・「すでにLNGを積載している車両にLNGを積み込むことはできな

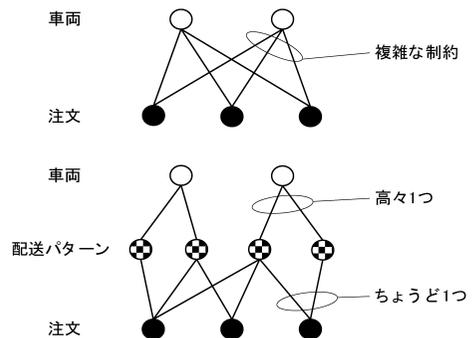


図7 配送パターン導入前後でのモデルの違い

い」・「配送する際には車両にLNGが積載されている必要がある」など、通常は明言されない当たり前の条件である。

定式化の方法にはさまざまなものが考えられるが、本件では各車両のスケジュールをグラフ上の一筆書きと考えて定式化を行った。図8は、ある1台の車両(cとする)が初日から2日間で取り得るスケジュールをグラフで表したもので、車両のスケジュールはこのグラフの枝の向きに沿った一筆書きと等価である。

左端の枝は計画対象期間の開始時点で車両がLNGを積んでいる(積置)か否かを表し、開始時点で積置か否かは所与の情報なので、グラフの最初の分岐ではどちらに進むかが決まっている。それ以外の各枝の意味を以下に示す。

- 夜間積置  
夜間にLNGを積載して基地で待機する。
- 夜間空置  
夜間にLNGを積載せずに基地で待機する。
- 昼間積置  
日中にLNGを積載して基地で待機する。
- 昼間空置  
日中にLNGを積載せずに基地で待機する。

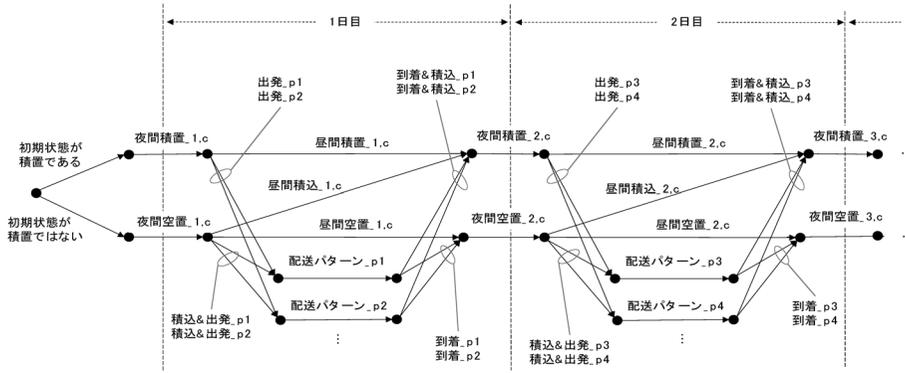


図 8 車両の取りうるスケジュールを表すグラフ

● 昼間積込

日中に基地に待機したまま LNG の積込を行う。

● 出発

(前日以前から LNG を積載していた車両が) LNG の積込を行わずに配送に出発する。

● 積込&出発

基地で LNG の積込を行って配送に出発する。

● 配達パターン

配達パターンを実行する。

● 到着

配送を終えて基地に到着する。

● 到着&積込

配送を終えて基地に到着したのち、LNG の積込を行う。

各枝を通るか否かを 0-1 変数  $x$  に対応づけると、この一筆書きは以下の制約条件で表すことができる。

以下での添え字は、 $c$ : 車両、 $d$ : 日付 (何日目か)、 $p$ : 配達パターンを表し、 $\gamma_c$  は計画開始時点で車両  $c$  が LNG を積載していれば 1、そうでなければ 0 をとる定数、 $P_{d,c}$  は  $d$  日目に車両  $c$  がとりうる配達パターンの集合である。

$$\gamma_c = x_{\text{夜間積置},1,c} \quad (1)$$

$$1 - \gamma_c = x_{\text{夜間積置},1,c} \quad (2)$$

$$x_{\text{夜間積置},d,c} = x_{\text{昼間積込},d,c} + \sum_{p \in P_{d,c}} x_{\text{出発},p} \quad (3)$$

$$x_{\text{夜間空置},d,c} = x_{\text{昼間積込},d,c} + x_{\text{昼間空置},d,c} + \sum_{p \in P_{d,c}} x_{\text{積込\&出発},p} \quad (4)$$

$$x_{\text{出発},p} + x_{\text{積込\&出発},p} = x_{\text{配達パターン},p} \quad (5)$$

$$x_{\text{配達パターン},p} = x_{\text{到着\&積込},p} + x_{\text{到着},p} \quad (6)$$

$$x_{\text{昼間積置},d,c} + x_{\text{昼間積込},d,c} + \sum_{p \in P_{d,c}} x_{\text{到着\&積込},p} = x_{\text{夜間積置},d+1,c} \quad (7)$$

$$x_{\text{昼間空置},d,c} + \sum_{p \in P_{d,c}} x_{\text{到着},p} = x_{\text{夜間空置},d+1,c} \quad (8)$$

一筆書きで枝を通ることを、グラフ上を流れるフローと思うと、各制約条件はグラフの頂点での流量の保存則となっている。制約条件の左辺が頂点に入ってくる流量、右辺が頂点から出ていく流量である。

さらに要件 F), G) を加味すると、配達パターン選択は以下の最適化問題として表される。

minimize

$$ay_o +$$

$$\sum_p (bx_{\text{積込\&出発},p} + c_p x_{\text{配達パターン},p} + bx_{\text{到着\&積込},p})$$

subject to

$$(1) \sim (8)$$

$$\sum_{p \in P_o} x_{\text{配達パターン},p} + y_o = r_o \quad (9)$$

$$x_{*,d,c} \in \{0, 1\}$$

$$y_o \geq 0$$

目的関数の  $a$ ,  $b$ ,  $c_p$  はそれぞれ、注文の必要台数が満たされなかった場合のペナルティ、基地での LNG 積込にかかる時間、配達パターン  $p$  の所要時間を表す定数である。また、制約条件 (9) の  $r_o$  は注文  $o$  の必要台数を表す定数、 $P_o$  は注文  $o$  に対応する配達パターンの集合、 $y_o$  は注文  $o$  の必要台数に対する車両の不足数を表す変数である。

乗務員ID	名前	所属基地			所属会社
		aaaa	bbbb	cccc	
1001				○	11xx
1002				○	22yy
1003				○	11xx
1004				○	22yy
1005				○	22yy
1006				○	22yy
1007			○		33zz
1008			○		33zz

図 9 乗務員のマスターデータ

車両	車種	所属基地	所属会社	備考
101	10	bbbb	11xx	
102	11	aaaa	11xx	
103	11	aaaa	11xx	
104	11	aaaa	11xx	
105	12	aaaa	22yy	
109	13	bbbb	22yy	
110	13	bbbb	22yy	
111	11	bbbb	22yy	
112	11	aaaa	33zz	
113	10	aaaa	33zz	

図 10 車両のマスターデータ

配送先ID	車両														
2001	129	130	135	137	147	148	367	368	377						
2002	401														
2003	109	110	111	112	113	114	115	116	118	119	120	121	122	123	124
2004	109	110	111	112	113	114	115	116	118	120	121	131	132		
2005	244	245	246	250	251	252	253	254	257	258	259	260	261	262	263
2006	101	102	103	104	105										
2007	221	222	225	229											
2008	101	102	103	104	105	129	130	135	137	147	148				
2009	101	102	103	104	105										
2010	101	102	103												
2011	101	102	103	104	105										

図 11 配送先-車両のマスターデータ

オーダーID	日付	時刻	配送先ID	車種	台数
ORDER_101	2019/9/1		2103	13	3
ORDER_102	2019/9/1		2103	13	3
ORDER_103	2019/9/1		2103	14	3
ORDER_104	2019/9/1		2103	14	3
ORDER_105	2019/9/1		2502	14	1
ORDER_106	2019/9/1		2508	15	1
ORDER_107	2019/9/1		2508	15	2
ORDER_108	2019/9/1		5007	14	4
ORDER_109	2019/9/1		5005	14	2
ORDER_110	2019/9/1		4048	10	1
ORDER_111	2019/9/1		4048	14	3
ORDER_112	2019/9/1		5008	13	1
ORDER_113	2019/9/1		8014	13	1

図 12 オーダーデータ

date	車両		
	101	102	103
2019/9/1	乗務員 1008 xx xx aaaa 06:30:00 ORDER_102 10:30:00-12:00:00 RRRR aaaa 16:00:00	乗務員 1021 xx xx aaaa 07:00:00 補給 07:00:00-08:00:00 ORDER_98 13:00:00-14:30:00 CCCC aaaa 19:30:00	乗務員 1003 xx xx cccc 10:20:00 ORDER_115 13:00:00-14:30:00 WWWW cccc 17:10:00
2019/9/1			
2019/9/2	乗務員 1003 xx xx aaaa 09:20:00 補給 09:20:00-10:20:00 ORDER_208 13:00:00-14:30:00 HHHH aaaa 18:10:00		乗務員 1015 xx xx cccc 07:10:00 補給 07:10:00-08:10:00 ORDER_179 AAAA cccc 20:20:00
2019/9/2	横置 17:10:00-18:10:00		横置 19:20:00-20:20:00
2019/9/3		乗務員 1108 xx xx aaaa 09:00:00 補給 09:00:00-10:00:00 ORDER_256 14:00:00-15:30:00 RRRR aaaa 19:30:00	乗務員 1028 xx xx cccc 05:20:00 ORDER_214 10:00:00-11:30:00 PPPP cccc 16:10:00
2019/9/3			
2019/9/4		横置 17:00:00-18:00:00	

図 13 配車結果 (車両ごとの予定)

この最適化問題を解くことにより、最適な車両のスケジュールが得られる。

実際のツールでは、本節の「配送パターン選択」で車両のスケジュールを決めた後に、「補給パターン列举」・「補給パターン割り当て」・「乗務員割り当て」処理を実行して積込・乗務員を考慮した計画を立てているが、前述のとおり、紙面の都合上それらの処理については説明を割愛する。

### 3.5 モデルについてのまとめ

本件では、ありうる配送パターン・補給パターンを全列举して、それらの中から最適な組合せを選択するというアプローチでモデルを構築した。

このアプローチのメリットは 3.3.3 節で述べたように最適化問題の定式化が簡素になることに加え、要件の追加・変更に対応しやすいこともある。要件の追加・変更の内容によっては、最適化問題の定式化の変更が困難であったり、変更したことによって現実的な時間では解が得られなくなるというリスクがあるが、配

送パターン・補給パターンの列举は一般的なプログラミング言語 (本件では Python) を用いて実装できるため、そのようなリスクが比較的小さいと考えられる。

## 4. 開発した自動配車システム

開発した自動配車システムは、Excel で操作できる GUI を備えている。まず、基地、ローリー車、乗務員、配送先とそのそれぞれの可能な組合せなどをマスターデータとして用意し、システムにインポートする。図 9~10 に乗務員、車両のマスターデータを、また、図 11 に配送先と車両の組み合わせのマスターデータを示す。車両および乗務員には、それぞれ所属基地と所属会社があり、ある会社に所属する乗務員は同じ所属会社の車両にのみ乗車することができる。

次に、配車を行いたい期間のお客さまから受注したオーダーデータを図 12 の形式で準備し、自動配車システムにインポートして、配車を実行する。

配車が完了すると、図 13 のような結果がはき出さ

れる。図 13 からは、車両ごとに期間内の毎日の予定を確認できる。このほかにも、乗務員やオーダーごとの予定の一覧を確認できる結果を出すこともできる。

自動車配車システムを用いて、2,500 件のオーダーを 200 台のローリー車で配送する場合の配車を行ったところ、計算時間は約 10 分であった。用いた最適化ソフトウェアは、Numerical Optimizer である。

## 5. まとめと今後の展望

ローリー車による LNG 販売事業のロジスティクス最適化に向けて、ローリー車の自動配車システムを開発した。これまで、4 人で数日間かけて行っていた 1 カ月分の配車業務を、10~20 分で行うことができ、大幅な効率化を実現した。お客さまからの緊急の受注変更依頼への対応も含めれば、効果はさらに大きくなる。

本システムでは、ローリー車の年間走行距離や乗務員の労働時間の最適化も目的関数に入っている。ローリー車の稼働を最適化し、必要となる車両を減らして

いくことで、配送効率の向上による輸送コスト低減を目指していく。また昨今、運送業界では乗務員不足による配送トラブルが顕在化してきていることから、乗務員の最適配置や労働時間の最適化といった労務管理強化にも本システムを活用していく予定である。

さらに、今後は、日々のお客さま LNG 使用量の予測と組み合わせることにより、お客さまからの受注に基づく配送計画だけでなく、配送日の提案を可能とすることで、ロジスティクスの一層の最適化を検討していきたい。

## 参考文献

- [1] 稲村栄一, “都市ガス製造における最適化,” オペレーションズリサーチ: 経営の科学, **37**(11), pp. 528-531, 1992.
- [2] 中井洋平, “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,” オペレーションズリサーチ: 経営の科学, **61**(1), pp. 30-34, 2016.
- [3] 盛野幸一, 細野英之, “最適化手法を用いたエネルギーシステム設計—事務所ビルにおける一次エネルギーおよび CO<sub>2</sub> の最小化—,” NTT データ数理システムユーザーカンファレンス論文集, 2007.