

容器内圧力を考慮する水素サプライチェーン最適化問題の紹介

(株)東芝 研究開発センター	*鵜川 知哉	Tomoya Ukawa
(株)東芝 研究開発センター	吉田 琢史	Takufumi Yoshida
(株)東芝 研究開発センター	榊原 静	Shizu Sakakibara
(株)東芝 研究開発センター	愛須 英之	Hideyuki Aisu

1. はじめに

カーボンニュートラルに向けて水素エネルギーが注目されている。カーボンニュートラルに向けた水素の利活用では、利用のみではなく、水素の製造、輸送、貯蔵も含めた水素サプライチェーンを対象とした研究開発に取り組むことが重要である。本稿では、水素サプライチェーンとして、水素製造拠点で作られた水素をポンペ配送トラックやタンクローリーで各水素供給拠点に配送し拠点毎の様々な用途で利用することを想定する。本稿では、日毎にどの拠点にどの手段で水素を運ぶかの割当スケジュールの作成(水素サプライチェーン問題)を数理計画問題として定式化することで、整数計画ソルバーで求解させる。また、問題規模を変えた実験を行い、どこまで整数計画ソルバーが対応できるか検証する。その結果、現実的な問題規模に対して整数計画ソルバー適用が困難なことが判明し、問題構造に適した高速なヒューリスティクス開発の必要性を確認した。

2. 定式化

水素サプライチェーン問題の定式化を紹介する。本稿では、割当問題のエージェントとして水素供給拠点、ジョブは水素ポンペとタンクローリーを用いる。

目的関数ではポンペ配送トラックとタンクローリーの総移動距離、及び用意された水素ポンペ数の内使った水素ポンペの数を考慮している。

本研究独自の制約として水素ポンペの内部差圧制約がある。水素ポンペを使用する際、FCV(燃料電池自動車)やFCFL(燃料電池フォークリフト)等は、水素ポンペと社内内蔵タンクとの差圧で水素を供給するため内部残量が少ない水素ポンペからは水素を充填できない。よって、本研究では拠点の集合の内、このような制約を考慮する拠点については水素ポンペの残量が一定量以上の状態でないと使用することができないという水素ポンペ使用制約が入っている。

タンクローリーの制約について述べる。一日の水素の使用量が水素ポンペの容量を超える水素供給拠点には水素タンクがついており、タンクローリーは水素製造拠点で製造した水素に対して、水素製造拠点かタンク付きの水素供給拠点のタンクに水素を運ぶことが出来る。タンクローリーは水素製造拠点とタンク付きの水素供給拠点間の移動のみとする。

作成した数理モデルの概要を表1に示す。定式化に用いる定数と変数を示す。 M :ビッグM, I :拠点の集合, J :水素ポンペとタンクローリーの集合, T :日程の集合, i^s :水素製造拠点, i^t :タンク付き水素製造拠点, i^l :FCV/FCFL, k_i :拠点*i*の水素ポンペ設置可能数, b_j :水素ポンペ(タンクローリー)*j*の容量, a_{it} : t 日における拠点*i*の水素要求量, $d_{i_1 i_2}$:拠点*i*₁から拠点*i*₂までの距離. u_{ijt} : t 日に水素ポンペ*j*を拠点*i*で使用するなら1/そうでなければ0, v_{ijt} : t 日に水素ポンペ*j*を拠点*i*で使用する水素量(Nm³), v_{it} : t 日に拠点*i*のタンクで補充する水素量(Nm³), $y_{i_1 i_2 jt}$: t 日に水素ポンペ*j*を拠点*i*₁から拠点*i*₂へ移動するなら1/そうでなければ0, $z_{i_1 i_2 t}^1$: t 日に拠点*i*₁から拠点*i*₂へ移動する水素ポンペがあるなら1/そうでなければ0, $z_{i_1 i_2 t}^2$: t 日に拠点*i*₁から拠点*i*₂へ移動する水素ポンペがあるなら1/そうでなければ0, q_j :水素ポンペ*j*を一度も使用しないなら1/そうでなければ0.

表1:作成した数理モデル

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i_1 \in I} \sum_{i_2 \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} d_{i_1 i_2} z_{i_1 i_2 t}^1 + d_{i_1 i_2} z_{i_1 i_2 t}^2 - w_3 q_j \\ \text{s.t.} \quad & \text{水素ポンペの割当てに関する制約} \\ & \sum_{i \in I} x_{ijt} = 1, \sum_{j \in J} x_{ijt} \leq k_i, \sum_{j \in J} v_{ijt} = a_{it}, \quad i \in I, j \in J, t \in T. \\ & \text{水素ポンペ使用制約} \\ & \sum_{i_1 \in I} \sum_{t_1=0}^{t_2} v_{i_1 j t_1} \leq b_j - e_{i_2 j} u_{i_2 j t_2}, \quad i_2 \in I^l, j \in J, t_2 \in T. \\ & \text{タンクローリーの制約} \\ & \sum_{j \in J} v_{i^s j t} + \sum_{i_2 \in I^l} v_{i_2 t} = a_{i^s t}, \quad t \in T. \\ & \sum_{i_1 \in I} v_{i_1 t_1} + \sum_{t_1=0}^{t_2} a_{i_1 t_1} - \sum_{t_1=0}^{t_2} \sum_{j \in J} v_{i_1 j t_1} \leq 0, \quad i \in I^l, t \in T. \\ & \text{目的関数の制約} \\ & \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \frac{u_{ijt}}{M} \leq 1 - q_j, \quad j \in J. \\ & \sum_{j \in J} y_{i_1 i_2 jt} \leq M z_{i_1 i_2 t}^1, \quad i_1, i_2 \in I, t \in T. \\ & -v_{it} \leq M z_{i^s i^t}^2, \quad i \in I^l, t \in T. \end{aligned}$$

3. 実験結果

第2章で述べたモデルについて検証実験を行う。実験は2

種類行い実験 1 では拠点数と水素ボンベ数を固定して計画日数を増やしていく。実験 2 では、計画日数を固定して拠点数と水素ボンベ数を増やしていく。ボンベ配送トラックとタンクローリーは 1 台ずつで、日毎に水素製造拠点を出発して水素を配送後再び水素製造拠点へ戻るものとする。整数計画ソルバーとしてGurobiOptimizer[1]を用いて計算時間一時間内で出力された解の精度(暫定値/下界値)について考察する。本稿行う実験の種類について表 2 に記載する。実験 1 の実験結果を図 1、実験 2 の実験結果を図 2 に示す。

表 2: 実験の種類

	拠点数	水素ボンベ数	計画日数
実験 1	5	20	5, 10, 20, 30
実験 2	5, 10, 15, 20	20, 40, 60, 80	10

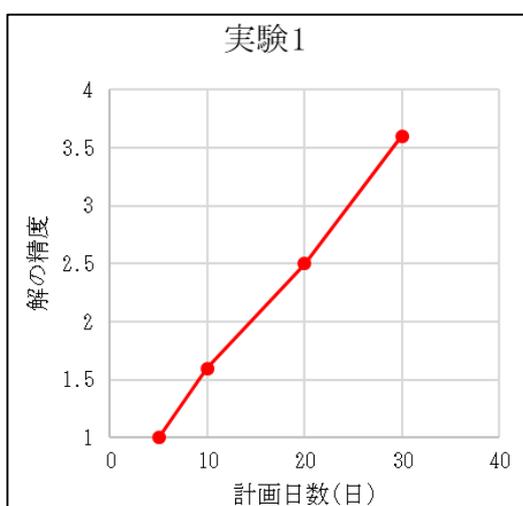


図1: 実験1の実験結果

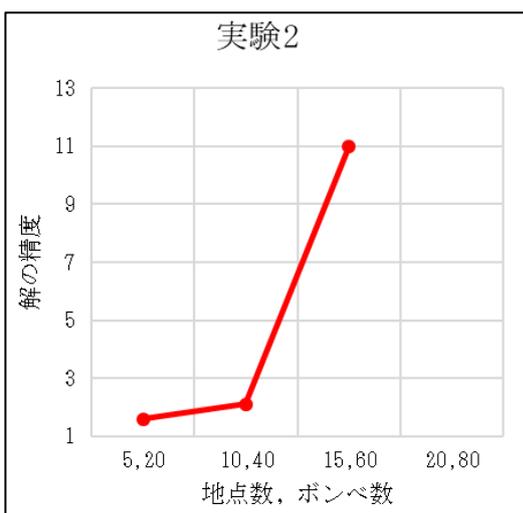


図2: 実験2の実験結果

実験結果について考察する。実験1では計画日数5日の場合、5分程度で最適解が出力され、計画日数10日の場合も5分程度で解の更新が止まり、その後1時間以上は下界値の更新のみが行われた。計画日数20日では30分で暫定値の更新が止まった。計画日数30では、暫定値の更新は30分程度で止まり、その後しばらく下界値の更新が続いたが、計算に一時間以上かけても暫定値との差が縮まらなかった。実験2では、拠点数が15、ボンベ数が60本を超えると途端に計算速度が低下し、一時間の求解時間では良い解を探索しきれていないように見受けられた。また拠点数が20、ボンベ数が80本の問題例では一時間で実行可能解が出力されなかった。作成した数理モデルはFCFL/FCVやタンク付き水素供給拠点に関する制約が多く存在し、問題例にこのような拠点数が多数存在するとGurobiOptimizerのような分子限定法[2]に基づく整数計画ソルバーを用いた場合、実行可能解を発見するのが困難になったと考えられる。

4. おわりに

本稿では水素サプライチェーンをモチーフとして、水素製造拠点で作られた水素を水素ボンベやタンクローリーに充填し、各拠点到に配送し拠点毎の様々な用途で利用することを検討した。そして、水素サプライチェーン問題として、ボンベ配送トラックやタンクローリーでの輸送距離や使用するボンベ数について最適な割当スケジュールを作成することを目標とした数理モデルを作成した。得られた数理モデルに対して整数計画ソルバーによる求解実験を行った。その結果、整数計画ソルバー適用可能な拠点数/ボンベ数/計画日数に関する問題規模の目安が分かった。

実際にガスボンベを各事業所/家庭にトラックで配送する業者等では、消費者72000戸に対して配送車両30台で計画配送を対象にしており、日によっては100本以上のボンベをトラックに積んで配送するケースも考えられる[3]。そのため、そのような問題規模を想定すると、この問題に対する独自のヒューリスティクスを開発する必要がある。

参考文献用スペース

- [1] Gurobi Optimization: Gurobi Optimizer Reference Manual Version 9.1. Gurobi Optimization, 2022.
- [2] 茨木 俊秀, 組合せ最適化における困難とその克服-行商人問題の例から-, 公共社団法人 計測自動制御学会 「計測と制御」, Vol. 20, 1989.
- [3] 福岡ライフエナジー株式会社, 「LP ガス事業 配送業務」, <https://www.fle.co.jp/gas/>, (2022-12-23 参照).