

博 士 論 文

社会システムに対する数理計画に基づく  
シミュレーション技法に関する研究

令和7年 3月

富山県立大学大学院工学研究科

松 崎 仁 平



## 内 容 梗 概

Society 5.0 をはじめとするスマート社会の実現に向けては，社会に内在する人々の意思決定プロセスのモデル化が課題となっており，その手法の一つとして社会シミュレーションが注目されている．社会システムにおいては既存のものか新規なものに関わらず，人々の局所的な意思決定がシステムの大域的挙動を形成し，他方で大域的な挙動が個々人の意思決定に拘束を与えるという，ミクロ・マクロ・プロセスであることが知られている．そのようなシステムの理解あるいは設計に向けての一方策として，システムに内在する各個人が最適な行動を取る，またはそのシステムに最大限貢献することを前提として，人々の意思決定および相互作用のダイナミクスを記述することにより，そのシステムの性能の上界値を求め，これを運用方針やシステム設定の良し悪しを測る評価基準とするアプローチが考えられる．

特に人が関わるサービスの改善や検討，社会現象の評価などに対して従来，システム運用の観点からシステム全体を最適化する最適化手法をシミュレーションに組み込む取り組みが見られる．本論文ではこのアプローチを一般的枠組みに昇華するべく，特に社会システムの最適化モデリングやシステム評価のための最適化モデルを前提としたシミュレーション手法を検討した．

一方，意思決定やシステムの運用方法の立案を最適化問題と捉えた際に，計算時間が課題となることが多い．そのような最適化問題を解くに当たってはヒューリスティック手法が用いられることが多いが，ヒューリスティック手法のみで解く場合には目的関数と制約条件が等式あるいは不等式で構成される数理計画モデルが直接適用できない．そこで本論文では数理計画法を用いることの利点を整理した．特にヒューリスティック手法と組み合わせる場合のモデリングや最適化手法を取り上げ，対象問題の構造理解や分解方法について議論した．

本論文では以上のように，社会システムの評価・設計技法としての数理計画モデルに基づくシミュレーションモデルおよび最適化技法を提示し，具体的な課題への適用を通じてそれらの有効性・可能性が示された．



# 目次

第 1 章 序論	1
1.1 背景および目的	1
1.2 論文の構成	3
第 2 章 最適化指向シミュレーション	5
2.1 社会システムのモデリング	5
2.2 数理計画法に基づくシミュレーション手法	6
2.3 ヒューリスティクスとのハイブリッド手法	6
第 3 章 スマートグリッドを活用した新たなサービスに対する全体最適化モデルと評価	11
3.1 はじめに	11
3.2 EV タクシーを活用した電力需給バランス調整システム	12
3.2.1 問題の概要	12
3.2.2 関連研究と本研究の位置付け	13
3.3 全体最適化モデル	15
3.3.1 概要	15
3.3.2 数理計画モデル	16
3.4 検証	20
3.4.1 シミュレーション設定	20
3.4.2 結果	22
3.5 おわりに	24
第 4 章 メタヒューリスティクスと数理計画法を組み合わせたごみ収集サービスに対する最適化手法と評価	29
4.1 はじめに	29
4.2 ごみ収集・運搬サービス	30
4.2.1 ステーション配置	30
4.2.2 収集・運搬ルート	32

---

4.2.3	関連研究と本研究の位置づけ	33
4.3	メタヒューリスティクスを用いたステーション配置と収集・運搬ルートの同時最適化	36
4.3.1	ステーション配置問題のモデル化	36
4.3.2	収集・運搬ルート問題のモデル化	38
4.3.3	収集・運搬ルートを考慮したステーション配置最適化	43
4.4	検証	45
4.4.1	妥当性の確認	45
4.4.2	シミュレーション設定	46
4.4.3	結果	47
4.5	おわりに	49
<b>第 5 章</b>	<b>大規模・多制約スケジューリング問題に対するハイブリッド手法</b>	<b>51</b>
5.1	はじめに	51
5.2	対象とする機械加工スケジューリング問題	52
5.2.1	対象工程	52
5.2.2	混合整数計画モデル	53
5.3	MIP 近傍局所探索法に基づく解法	62
5.3.1	概要	62
5.3.2	提案する MIP 近傍局所探索法の手順	63
5.3.3	フィルタ設定	63
5.4	検証	64
5.4.1	実験設定	64
5.4.2	結果	67
5.5	おわりに	69
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>71</b>
6.1	本論文のまとめ	71
6.2	今後の課題	72
	<b>謝 辞</b>	<b>73</b>
	<b>参考文献</b>	<b>75</b>
	<b>本研究に関する発表</b>	<b>79</b>

# 目 次

2.1	提案するシミュレーション手法のイメージ	7
2.2	解空間におけるハイブリッド手法の探索イメージ	9
2.3	決定変数空間におけるハイブリッド手法の探索イメージ	10
3.1	対象とするスマートグリッド	12
3.2	数理計画モデルの概要	16
3.3	タクシーの電力消費	23
3.4	バッテリーの蓄電量	25
3.5	バッテリーの状態	25
3.6	夏のピークカット効果	26
3.7	夏と冬のピークカット効果の比較	26
3.8	夏と冬の電力需要とピークカット効果	27
4.1	ごみ収集サービスの問題構造	31
4.2	現在のステーションまでの距離に関する質問	32
4.3	許容できるステーションまでの増加距離に関する質問	33
4.4	現在のステーションまでの距離に関する質問への回答	34
4.5	許容できるステーションまでの増加距離に関する質問への回答	35
4.6	ステーション配置の解表現	39
4.7	ステーション配置の探索プロセス	44
4.8	収集・運搬ルートの生成	45
4.9	ステーション配置の近傍定義	46
4.10	SA における収集・運搬コストの遷移 (城端地区)	48
4.11	SA における収集・運搬コストの遷移 (福野地区)	49
5.1	自動パレットシステム	53
5.2	スケジュール例	54
5.3	解空間における探索	64
5.4	決定変数空間における探索	65



# 表 目 次

3.1	タクシーの運行データ . . . . .	22
3.2	地域の電力需要データ . . . . .	24
4.1	対象地区 . . . . .	46
4.2	ステーション配置最適化によるステーションまでの距離の変化量 (城 端地区) . . . . .	48
4.3	ステーション配置最適化によるステーションまでの距離の増加量 (福 野地区) . . . . .	49
5.1	フィルタの自由変数の組み合わせ . . . . .	66
5.2	対象問題のワーク数と納期 . . . . .	66
5.3	対象問題に対する納期余裕の総和と計算時間 . . . . .	67
5.4	フィルタの効果に関する検証結果 . . . . .	69
5.5	フィルタ E の選択確率に関する検証結果 . . . . .	69



# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景および目的

政府が提唱する Society 5.0 やスマート社会の実現に向けて、人々の意思決定プロセスのモデル化が課題となっており、その手法の一つとして社会シミュレーションが注目されている<sup>1, 2, 3)</sup>。特にスマートシティの実現を目指して、データの利活用や様々な社会サービスの改善や新規構築が求められている。現在においてエネルギーや交通などの様々なサービスが運用されているが、人口減少や環境問題などの社会変化を背景に、より高度な社会を実現するためにはサービスの運用の効率化や見直しなどが必要である。他方、高度化した IT などの技術や近年蓄積されてきた様々なデータを活用した新たなサービスの検討も進められている。これらに際しては既存のものか新たなものかに関わらず、人の意思決定が含まれることが多い。

人は必ずしも最適な決定をするとは限らないが、基本的には自身の利益を最大化する行動を取ることが多い。その結果、それらの主体が内在するシステムに対して影響を及ぼし、システムの大域的な振る舞いが定まる。さらにこれにより主体の意思決定を拘束する影響を与えるミクロ-マクロ・プロセスが社会システムにおいて成立していると言える。他方、個々の主体の意思決定プロセスのモデル化において不確実性を考慮したような現実的な決定方針をモデル化することは難しい。そこで各個人が最適な行動を取る、またはそのシステムに最大限貢献することを前提としてそのシステムの性能の上界値を求め、これを運用方針やシステム設定の良し悪しを測る評価基準とすることが考えられる。そしてシステム運用においては運用方針のみならず、現在ではノウハウがないために自動化が可能な作業を人手で行っているといった課題もある。このような作業を自動化することもシステムの効率化につながると言える。

特に人が関わるサービスの改善や検討、社会現象の評価などにおいてはマルチエージェントシミュレーションを代表としたシミュレーション手法が取られるのが代表的である<sup>4, 5)</sup>。しかしこうしたシミュレーションでは個々の意思決定主体(人など)

がそれぞれ自身の利益を最大化するような行動をとることが前提となる場合が多く、システムの運用の観点からシステムを適切に評価できているとは言い難い。こうした背景を踏まえシステム運用の観点からシステム全体を最適化する最適化手法をシミュレーションに組み込む取り組みも見られる。例として Santos らの研究<sup>6)</sup>では、カーシェアリングサービスを対象としてシステムを運用する事業者の視点から車両の再配置に関する意思決定を最適化モデルによって行うツールを提案し、妥当性や利益について検証している。

そこで本論文ではこれらのアプローチを一般的枠組みに昇華するべく、特に社会システムの最適化モデリングやシステム評価のための最適化モデルを前提としたシミュレーション手法を検討する。対象のシステムを最適化モデルとして定式化することにより制約条件を明確化し、その中で最大限の効果を得るためのシステムの振る舞いを獲得することを目指す。得られた解を評価することにより不足している制約が明確になったり、無駄と考えられる制約を再検討することができる。また、理由が不明なまま以前から守られているルールが明確になり、システムの運用方針の決定に寄与することも考えられる。

こうした意思決定やシステムの運用方法の立案を最適化問題と捉えた際に計算時間が課題となることが多い。必要な決定の種類や数が多かったり、制約条件が多い複雑な問題に対しては最適解を得ることが現実的に難しい。そのような最適化問題を解くに当たってはヒューリスティック手法が用いられることが多く、一般的に最適化問題を解く際には主に以下のような3通りの手法が取られる。

- 数理計画法
- ヒューリスティック手法
- ヒューリスティック手法と数理計画法の組み合わせ

ヒューリスティック手法のみで解く場合には目的関数と制約条件で構成される数理計画モデルが明示されないこともあるが、本論文では数理計画モデルに着目しこれを用いることの利点を整理する。特にメタヒューリスティック手法と組み合わせる場合のモデリングや最適化手法を取り上げ、対象問題の構造理解や分解方法について議論する。

以上を踏まえて本論文では、新たなサービスと既存の社会サービスをそれぞれ1つ取り上げ、これらのサービスに対する最適化モデルの提示とこれに基づく解法について議論する。まず最適化に基づくシミュレーションの可能性を示すため、EV タクシーを活用した新たな電力需給調整システムに対する数理計画モデルを提案し、これを用いたシステムの運用シミュレーションを行う。数理計画モデルを用いることで問題設定に対する最適な運用方法を得ることができ、そのシステムの性能の最大

値を求めることができる。問題設定にあたる部分を変更して複数のシミュレーションを行うことによりシステム設計の方針策定に重要な情報を与えることができると考える。

そしてより大規模な問題を対象としてメタヒューリスティック手法と数理計画法を組み合わせることを検討する。自治体のごみ収集サービスを対象として、ごみステーションの配置と収集ルートを最適化することにより運用の効率化を目指す。本問題に対しては住民の利便性を考慮した上でステーション配置と収集ルートを最適化することにより削減可能なコストを示し、自治体のごみ収集サービスを見直す際の判断材料の一つとして提供するため本手法を提案する。

さらにより複雑な問題に対する最適化手法を体系化するため、決定変数に関わる特徴において社会システムと類似性が高い生産システムを取り上げ、とくに大規模かつ複雑な制約を有する問題である機械加工スケジューリングを対象としてモデル化とヒューリスティクスを組み合わせたハイブリッド手法を提案する。このヒューリスティクスでは混合整数計画法 (MIP: Mixed integer programming)<sup>7)</sup> によるモデルを活用する。

社会システムの設計に関連して、EBPM(Evidence-based policy making)<sup>8)</sup> という考え方がある。これは行政等における政策立案の際に求められる考え方で、政策目的を明確化した上で合理的根拠に基づくことである。こうした考え方に対して本論文が提案する手法では、数理計画モデルを作成する過程で対象システムの目的や制約を明確化することができる。加えて得られたシステムの振る舞いは所与のシステム設定に対する最適解であることから根拠が保証されていると言える。また想定するシステムによってはシステム設定にあたる一部に現実のデータを利用することができ、その点も含めヒューリスティクスを用いる場合でも一定の合理的根拠を保証できると考える。以上の観点から本論文はEBPMにも寄与すると言える。

## 1.2 論文の構成

以下に本論文の構成を述べる。

第2章では、本論文が目指す最適化手法に基づくシミュレーションの概要について述べる。

第3章では、スマートグリッドを取り上げ、EV タクシーを活用した電力需給調整を行う新たなサービスの運用方法と実現可能性を検討する。対象サービスを数理計画モデルとしてモデル化し、システム設定にあたる定数を変え様々なシミュレーションを行うことで、システムの評価・設計に寄与することを目指す。

第4章では、ごみ収集サービスの運用効率化を目指し、メタヒューリスティック手法と数理計画法を組み合わせた手法を提案する。特にごみの収集に関する運用に着目し、ごみ捨て場の配置と収集ルートを最適化することで効率化を目指す。問題規模が大きくなるためメタヒューリスティクスを取り入れ、計算量の削減を図る。検証では実在する地域を対象として、様々な設定でシミュレーションを行い、提案手法が対象サービスの運用方針の決定において検討材料となることを示す。

第5章では、メタヒューリスティック手法と数理計画法の融合に着目し、より複雑な問題である機械加工スケジューリング問題を対象として、これまでの提案手法の拡張について議論する。本章では数理計画モデルの構造に着目し、より一般化した議論を行う。

## 第 2 章

# 最適化指向シミュレーション

### 2.1 社会システムのモデリング

本論文では主に社会システムの評価を取り上げ、最適化手法を用いたシミュレーション手法を提案する。社会システムとは自治体サービスやインフラなどを指し、人が関わるシステムが多い。喜多による研究<sup>9)</sup>ではエージェントベースの社会シミュレーションについて議論しており、社会的状況をゲームとしてモデル化して個人が意思決定を行うゲーミングと組み合わせたハイブリッド手法として整理している。つまりミクロな視点に立った社会システムのシミュレーションである。このような研究に対して本論文では第 1 章でも述べたとおりシステムの運用者の観点から、マクロな視点で社会システムの運用則を獲得することを目指す。

社会システムは最適化問題と見なすことができるものも多く、本論文では数理計画法<sup>7)</sup>に基づきモデル化し、得られた最適解を評価することによって運用方針などの判断材料とすることを目指す。数理計画法では対象システムの理想的な振る舞いを獲得するため、その良し悪しを判断する基準である目的関数と、そのシステムが守らなければならない条件である制約条件を明示する必要がある。対象のシステムをモデル化した数理計画モデルは一般に数式を用いて以下のように表される。

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & f(\mathbf{x}) \\ \text{Subject to} & \mathbf{x} \in S \end{array}$$

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots)$  はそのシステムにおいて決定すべき事柄を表す決定変数、 $f(\mathbf{x})$  は目的関数、 $S$  は  $\mathbf{x}$  が取ることができる範囲を表す集合である。目的関数  $f(\mathbf{x})$  を最小化 (または最大化) する最適解  $\mathbf{x}^*$  を求めることで対象システムの理想的な振る舞いを獲得する手法である。この際  $S$  は予め決められている定数であり、システムに導入する各要素のスペックなどによって決められる。これらのスペックが変わると最適解も変わるため、こういったシステム設定に対する最適な振る舞いとその効果を得ることができる。これを利用しシミュレーションに活用する。

## 2.2 数理計画法に基づくシミュレーション手法

人間中心の社会構築に向けて人々の意思決定プロセスのモデル化が注目されているが、これに合わせて社会システムの運用についても検討していく必要がある。そこで本論文ではシステムの運用側の視点からのシミュレーションに着目する。社会システムに対するシミュレーションとは、対象システムに内在する意思決定主体の行動原理をモデル化し、個々の主体の振る舞いや得る利益、システムへの影響などを可視化するための手法であると言える。後藤の研究<sup>10)</sup>ではエージェントベースのシミュレーション手法について議論しており、特に人の意思決定において不確実性を考慮したモデルの構築や利点、課題などを整理している。同論文でも述べられているように、人のような意思決定主体は何らかの評価基準を持ち、現実的には自身の利益を最大化するように行動すると考えられる。他方、システムの運用者が自身、あるいはシステム全体に利益が得られるように個々の主体に対して何らかの策を講じることも考えられる。これを踏まえると、内在する主体が最適な行動を取る、またはシステムに最大限貢献すると仮定した場合に、対象システムが最大限得られる効果を示すことは運用方針の決定における判断材料となり得ると言える。

以上を踏まえ本論文では図2.1に示すようなシミュレーション手法を提案する。社会システムの運用方針の検討においては、導入する機器等のスペックに対する適切な振る舞いなどが判断材料となる。数理計画モデルにおける $S$ が導入する機器等のスペックに対応し、システムの設定として予め設定することができる。適切なシステム設定を求めるため、ある設定の下で最適化して得られた目的関数値 $f(\mathbf{x}^*)$ や最適解 $\mathbf{x}^*$ をシステム運用者が評価し、また異なる設定で最適化するということを繰り返す。システム設定に対する効果や振る舞いが得られるため、機器等のスペックを上げた場合に増加する利益や最適な行動が可視化される。また、数理計画モデルを明示する必要があるため、その過程で対象システムの隠れた制約や、結果を評価することで無駄な制約を見つけることにも役立つことが予想される。得られた解は前述のとおり個々の意思決定主体が最適な行動を取ることが前提であり、何もしなければ実際にはその通りの効果が得られるわけではないことが多いと予想される。しかし最適な行動が明示されているため、そのように行動してもらうように主体の意思決定を誘導する策を検討する際の参考になると考える。

## 2.3 ヒューリスティクスとのハイブリッド手法

本論文で取り上げるようなシミュレーションにおける意思決定を組合せ最適化問題と捉えると、解法として以下のような分類がある<sup>7)</sup>。

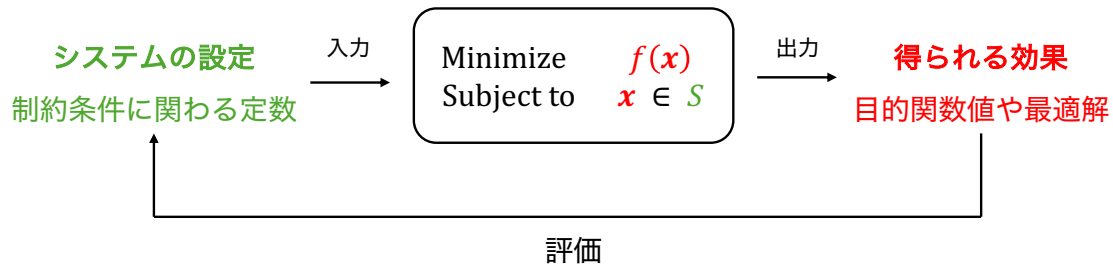


図 2.1: 提案するシミュレーション手法のイメージ

- 列挙法
- 発見的方法
- 探索法

列挙法は対象問題において全ての実行可能な解を並べ、最適解を見つける方法である。数理計画法は実質的に全ての実行可能解を探索し最適解を導出するため、列挙法に分類される。厳密な最適解を導出できる一方で、問題規模に応じて計算時間も増大するため大規模な問題に対して適用することは難しい。発見的方法は最適解または準最適解を得るためのアルゴリズムやルールを利用して1つの解を得る手法である。欲張り法などが発見的方法に分類される。一般に対象問題に対して特化したアルゴリズムであることが多い。探索法は解空間の一部を探索することによって最適解または準最適解を得る手法である。局所探索法などが探索法に分類される。発見的方法と異なり、汎用的で様々な問題に対して適用可能である場合が多い。また発見的方法と探索法では最適性が保証されず、厳密な最適解が得られるとは限らないが、アルゴリズムを工夫することで比較的短時間で良質な実行可能解が得られる手法である。

これらの手法は単独で用いられることもあるが、より大規模な問題に対しては計算時間が課題となることもあり、複数の手法を組み合わせたハイブリッド手法が用いられることも多い。森田の研究<sup>11)</sup>では大規模なスケジューリング問題を想定したハイブリッド手法について整理している。例えば解法Aを用いて初期解を求め、解法Bを用いてより良い解を探索する直列型ハイブリッドや、解法Aをベースにその一部の操作を解法Bに置き換える並列同期型などの分類が示されている。

シミュレーションにおいては問題規模によっては計算時間が長くなる場合もあり、本論文が提案する数理計画法を活用する場合ではより計算時間が課題となりやすい。数理計画法は最適解を導出することができる一方で、大規模な問題においては現実的な時間内に最適解を得ることは難しい。すでにシステム設定が決まっており、システムの振る舞いのみを獲得したい場合においては計算時間が長くても問題はない

が、本論文が提案するシミュレーション手法は適切なシステム設定を獲得することも目的としている。そのため、システム設定を変えて複数回のシミュレーションを行うことを想定しており、ある程度現実的な時間内に解を得ることが求められる。そこで探索法に分類されるメタヒューリスティクスと組み合わせて計算量の削減を図る。最適化問題はヒューリスティクスのみで解かれることも多いが、最適解に近い解が得られるとは限らない。また問題の性質によっては制約を満たす近傍解を生成すること自体が困難な場合もある。数理計画モデルに基づいてメタヒューリスティクスを適用することで、ヒューリスティクスの場合よりも最適解が得やすく、近傍定義も比較的容易になると考える。

本論文が提案するハイブリッド手法は森田の研究<sup>11)</sup>における分類では並列同期型が最も近い。メタヒューリスティクスにおける評価値を数理計画モデルによって算出するという構造と言える。一方で並列同期型はメタヒューリスティクスと数理計画モデルがそれぞれ決定する事柄は常に同じものが想定されていると考えられるが、提案手法では前のステップにおいてメタヒューリスティクスが決定したものを、次のステップでは数理計画モデルが決定することも考える。この点において森田の研究における分類に当てはまらないと言える。

ヒューリスティクスのみで解く場合、一般的に解表現は数理計画モデルにおける決定変数が該当する。そして近傍解は決定変数の一部の値を変更することで生成されるが、問題構造などによって近傍の取り方は様々である。また前述のとおり制約条件を満たすような近傍解の生成が困難な場合もある。数理計画モデルに基づいてメタヒューリスティクスを適用することで複数種の決定変数を求めることができ、制約違反も発生しないというメリットが挙げられる。

図 2.2 にメタヒューリスティクスと数理計画を組み合わせたハイブリッド手法の解空間における探索プロセスのイメージを示す。決定変数  $x$  を 2 種類に分割し  $x = (x_0, x_1)$  とすると、 $x_0$  をメタヒューリスティクスによって決定し、残りの  $x_1$  を数理計画モデルによって決定することを考える。暫定解から近傍解を生成する際に、メタヒューリスティクスによって  $x_0$  を決定 ( $x_0 = x_0^*$ ) することで解空間  $S$  が縮小された部分解空間  $S'$  が定義される。その解空間に対して数理計画法によって残りの決定変数  $x_1$  を決定することで次の探索ステップにおける暫定解 (近傍解) を得ることができる。

図 2.3 に決定変数空間における探索プロセスのイメージを示す。決定変数が  $x, y, z$  の 3 種類の例では、 $n$  回目の探索において決定変数  $z$  を固定し、残りの  $x, y$  について数理計画モデルによって決定する。メタヒューリスティクスによって  $z = z_{n-1}^*$  と決定することで決定変数空間は  $x, y$  のみの平面となる。そして数理計画法によって

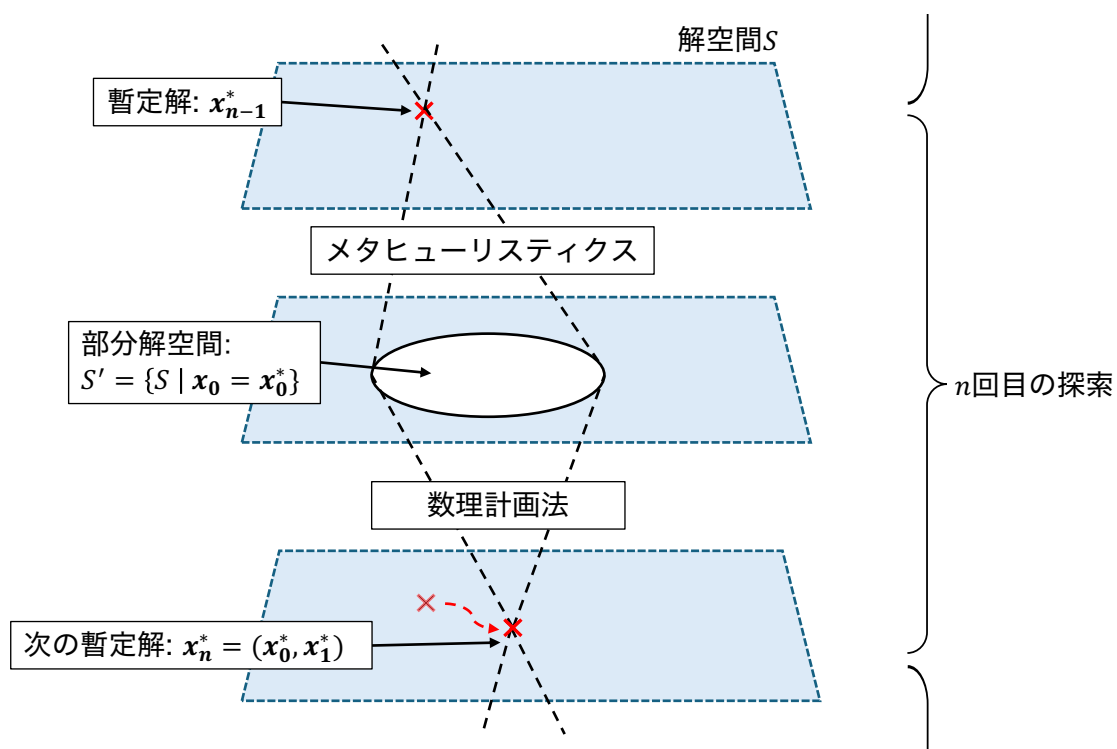


図 2.2: 解空間におけるハイブリッド手法の探索イメージ

この平面内の最適解を求めることで次の暫定解を得ることができる。

以上を踏まえ、本論文では数理計画モデルに基づくシミュレーション手法を提案し、大規模な社会システムに対応するためメタヒューリスティクスを取り入れたハイブリッド手法を検討する。

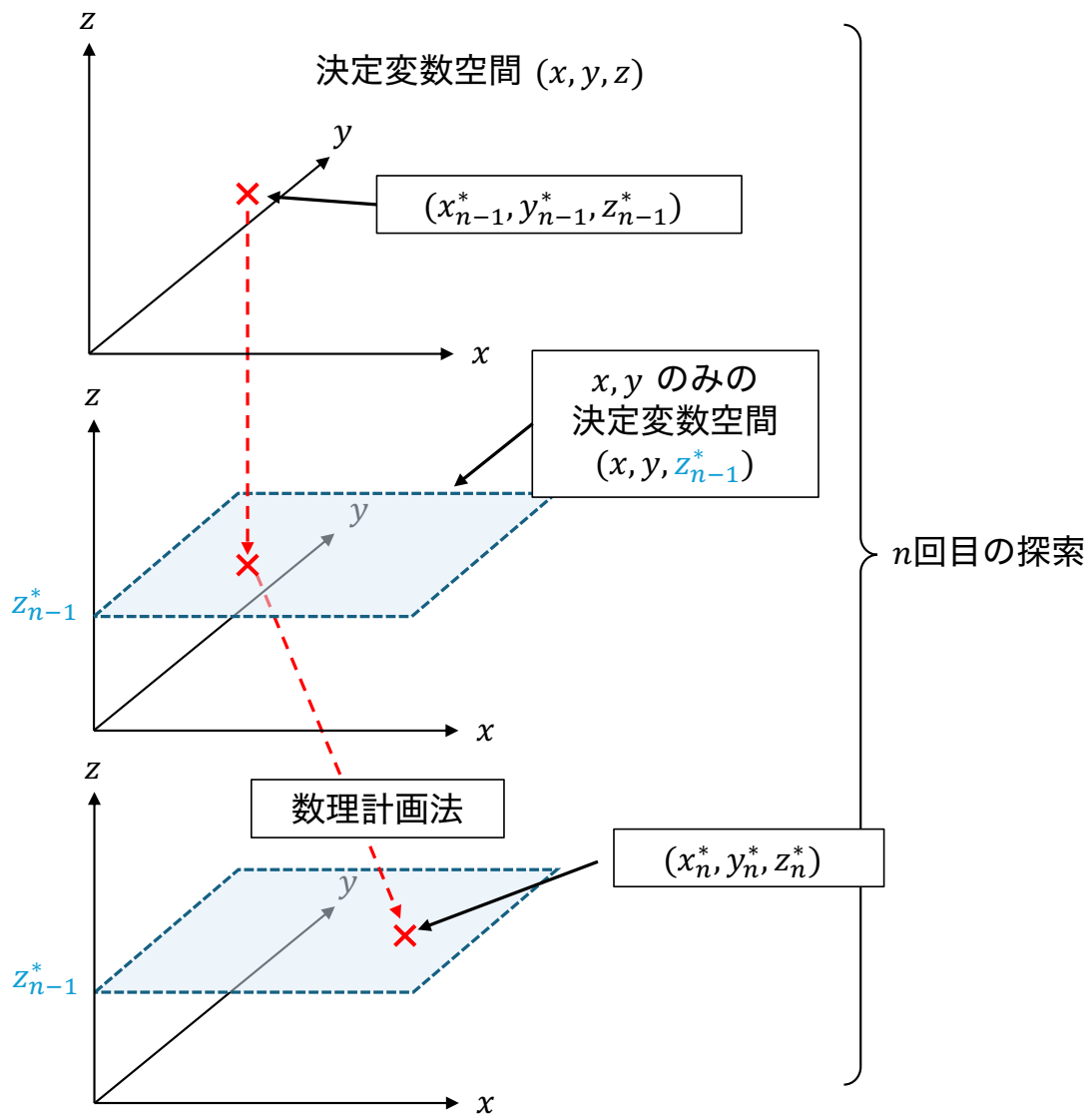


図 2.3: 決定変数空間におけるハイブリッド手法の探索イメージ

## 第 3 章

# スマートグリッドを活用した新たなサービスに対する全体最適化モデルと評価

本章ではスマートグリッドを活用した新たなサービスを取り上げ、数理計画法によるシミュレーションについて検討する。

### 3.1 はじめに

近年電力事業では、再生可能エネルギー等を用いた分散型の発電システムを ICT 技術を活用して効果的に制御するという、スマートグリッド化について種々の試みが報告されて久しい<sup>12, 13)</sup>。本研究が対象とするスマートグリッド図 3.1 のように表される。従来からの集中型大規模電源と再生可能エネルギーを一体運用することにより、高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムが具現化され、発電者のみならず価格や安定供給等の面において電力ユーザの効用も高まることが期待される。

本研究ではスマートグリッドに電気自動車 (EV: Electric Vehicle) が充放電するような状況を陽に扱う。このとき、EV の有する蓄電池から電力系統へ放電する機能 (V2G: Vehicle to Grid) や、家庭等の停電時に自家発電として EV の蓄電池を活用する機能 (V2H: Vehicle to Home)、あるいは EV の蓄電池を利用して別の EV の蓄電池を充電する機能 (V2V: Vehicle to Vehicle) 等がスマートグリッドの機能として顕在化される<sup>14)</sup>。この実現にあたっては、エネルギー効率の高い次世代自動車の普及や、充電インフラの整備、さらにはスマートメータによる高精度な電力の需要状況の見える化等が不可欠となる。

本研究では、上記のスマートグリッドの新たな機能の一つである、V2G による電力系統のピークカットを取り上げ、ピークカットの達成に必要なシステム要件を明かにする技法を提案する。具体的には、市町村規模の地域グリッドにおいて、電動化されたタクシー (以下、EV タクシーと呼ぶ) が地域の充放電スポットに接続し充放電しながら旅客サービスを提供するような状況を想定する。このときバッテリー

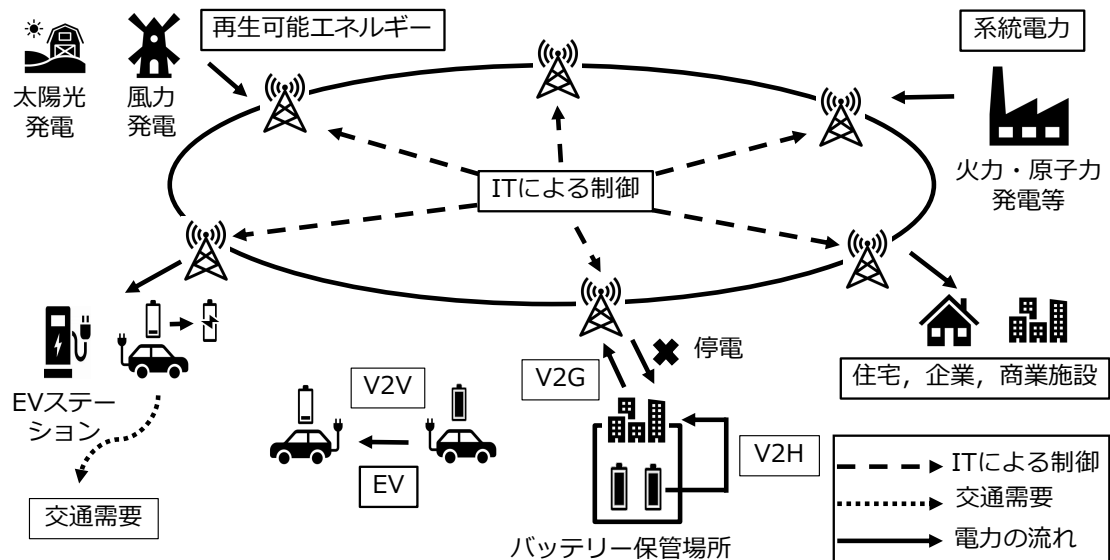


図 3.1: 対象とするスマートグリッド

はモジュール化され、EV タクシーは充放電スポットにある充電済みのバッテリー・モジュールと交換することにより自身の動力源を得ることになる。このようなサービスは世界各地で一部実証されつつあるが<sup>15, 16)</sup>、この交換可能なバッテリー・モジュールが対象地域に十分数存在する場合には、充放電スポットに保管されたバッテリーの電力を地域のピークカットのために放電するような利用形態が新たな機能として考えられる。

本研究ではそのために必要なシステム要件、すなわちどの程度の容量のバッテリーがいくつ地域に存在すれば、どれくらいのピークカットを実現することができるか、を明かにするような数理計画モデルを提案する。このモデルによって得られる最適解は想定するシステム性能の上界値（すなわち、性能限界）を与えることになり、システム設計者あるいは関係するステークホルダーの設計方針に重要な情報をもたらすと考えられる。

## 3.2 EV タクシーを活用した電力需給バランス調整システム

### 3.2.1 問題の概要

対象とする EV タクシー事業においては、一般的なタクシーと比較して、EV ステーション（以下、ステーションと呼ぶ）が少なく立ち寄りづらいことに加えて、連

続走行距離が短いといった問題がある。このような問題に対して、EV タクシーがいつステーションに立ち寄るかという EV タクシーの運用を最適化し業務の効率化を図る。

対象の EV タクシーのバッテリーはカートリッジ式を想定する。ステーションに保管されている充電済みのバッテリーと交換する運用方式であり、バッテリーの充電を待つ必要はない。また、ステーションに保管されているバッテリーは常に満充電されている必要はなく、EV タクシーの需要を十分満たすように最小限充電すれば良い。バッテリーを充電する時間帯について、発電量は電力需要の最大値に合わせて決まるため、この電力需要の最大値を増加させない時間帯に充電することが望ましい。

また、ステーションに保管されているバッテリーはステーションへ放電することによって、地域の電力系統へ電力を供給することが可能である。発電量を抑えるためには、電力需要が高い時間帯に系統へ電力を供給することが求められ、電力需要のピークカットが可能となる。本研究では、EV タクシーおよびカートリッジ式のバッテリーの運用を中心に、充電量の最小化およびピークカットの最大化を目的とした数理計画モデルで対象問題を記述し、地域の電力ネットワークを最適化する。

### 3.2.2 関連研究と本研究の位置付け

EV の充電スケジューリングを扱った関連研究について、例として、滑川らによる研究<sup>17)</sup>では、高速道路における EV によるステーションの選択をマッチング理論を用いて表現し、EV とステーションをプレイヤーとみなしたシュタッケルベルクゲームを用いて EV は充電量を、ステーションはエネルギー価格を決定する。また、水野らによる研究<sup>18)</sup>では、ステーションに到着した充電待ちの EV を待ち行列として表現し、モデル予測制御を用いて到着する EV 台数の不確かさを考慮した、系統からステーションへの電力供給スケジュールを算出している。若佐らの研究<sup>19)</sup>では、電力会社と家庭の間に電力小売り事業者が存在する場合を想定し、あらかじめ受け付けたリクエストに沿って作成された電力供給スケジュールに対し、直前に発生したリクエスト変更によって発生する余剰電力を最小化するように、モデル予測制御を用いて家庭の電気製品をスケジューリングする家庭向けのエネルギー管理システムを提案している。これらの研究は、発生した需要に対して支払うコストが小さくなるようにスケジューリングしている。

スマートグリッドやピークカットに関する研究として、金森らによる研究<sup>20)</sup>では、家庭の太陽光発電による余剰電力を共用の蓄電池に蓄え、ピークカットに利用する電力マネジメントモデルをエージェントシミュレーションによって検証してい

る。恩田らによる研究<sup>21)</sup>では、EV バッテリーを仮想化し電力取引システムが持つ仮想化大容量蓄電池を介して電力の仮想取引を行い、後から EV が電力網に接続された際に物理的な電力の移動を行うことで、EV が電力系統に接続していない時にも電力取引が可能な需給調整モデルを提案している。Das ら<sup>22)</sup>はグリッド、EV 所有者および利用者が最大の利益を得るような電力売買価格を数学モデルによって決定し、経済的に評価している。EV 所有者の利益はバッテリーの経年劣化や EV の導入コストを考慮している。Kumar ら<sup>23)</sup>は EV の充電優先度を考慮した動的スケジューリングによって、V2G 容量をリアルタイムに推定するアルゴリズムを提案している。これらの研究に対して、本研究で検討するシステムにおいては運用される EV にタクシーを想定しており、客を乗せている間はステーションに立ち寄ることができないなどの制限がかかる。

これらの関連研究は電力サービスに対する意思決定方策を提案するものである。一方で、本研究では EV タクシーを活用して地域の電力需要を賄う新たなサービスがもたらす価値と必要な条件について議論する。

そこで、本研究は最適な EV の運用スケジューリングとステーションに保管されているバッテリーを利用したピークカットの最大化を同時に行う地域の電力全体最適化モデルを提案する。EV タクシーを対象としているため、客を乗せていないときにバッテリーを交換するなどの制約がかかる点が特徴である。また、EV タクシーおよび地域の電力需要量に実際の一定期間のデータを用い、提案するモデルが現実に応用可能なことを確認する。

本研究の貢献として、計画期間全体における諸々の条件があらかじめわかっていることを前提とした下で、個々の EV タクシーが全体最適な動きをした場合に最大でどの程度の効果が得られるかを求めるための数理計画モデルを示すことにある。これより、対象サービスがもたらす効用の上界を明かにできる。つまり、所望の性能を達成するシステム要件を、計算機上で確認することができる。他方、現在、技術的・社会的の制約はあるものの、「xx の性能を得るには、どれだけの技術要素を導入する必要があるか」をシミュレーションで明らかにすることで、所望の目標(ピークカットの程度など)の実現可能性を評価できるのみならず、要素技術(バッテリー容量など)に課せられる技術目標を明確にできる。

### 3.3 全体最適化モデル

#### 3.3.1 概要

本研究の目的は与えられたシステム要件に対して得られる性能、つまり目標のサービス効用を得るのに必要なシステム要件を明らかにすることである。そこで地域の電力需要などの条件があらかじめわかっていることを前提とし、システム性能の上界を得るため、全体最適な運用解を得ることができる数理計画モデルを採用する。

本研究で扱う数理計画モデルの概要を図3.2に示す。EVのバッテリーを $B_i$ 、バッテリーを保管するステーションを $P_j$ 、各EV車両を $V_k$ とする。また対象とする期間を一定の時間幅をもつ区間に分割し、分割された各区間を期 $t$ とよぶ。さらに、ステーション $P_j$ へ放電することへの効用係数を $r_{j,t}$ とする。ここで効用係数とは、各期における単位あたりの電力供給によってステーションが得られる効果を表現したものである。従って、地域の電力需要が高い時間帯においては、バッテリーからステーションへの電力供給の効果は高く、効用係数が高く設定される。矢印は電力の流れを表し、黒の矢印はバッテリーが積まれている車両 $V_k$ からの放電量、青の矢印は電力系統からの電力供給量、赤の矢印は $P_j$ の給電スペースに保管されている全てのバッテリーからのピークカット量、橙の矢印は $P_j$ の充電スペースに保管されている全てのバッテリーへの充電量をそれぞれ表わす。ステーションはバッテリーを充電スペースと給電スペースにそれぞれ保管し、給電スペースに保管されているバッテリーは地域への電力供給、充電スペースに保管されているバッテリーは充電が可能とする。電力需要について、人間が活動する時間帯は日中であることが多く、そのときの電力需要は他の時間帯に比べ高い。さらに、夏は冷房による消費電力が顕著である<sup>24)</sup>。本モデルの目的の1つは、電力需要が高い時間帯にバッテリーからステーションへ放電し、発電で賄う電力需要の平準化である。さらに、バッテリーの充電量の抑制が第二の目的である。ピークカットのための地域への放電は電力需要のピーク時に行い、電力需要が小さい時間帯に充電することが望ましい。

本研究で扱うEV車両はタクシーであり、支障なく業務を行うため、交通需要を満たすことは必要不可欠である。そのため、バッテリーのSoC (State of Charge) が減少した場合、その後発生することが予想される交通需要を満たすようにステーションに保管されているバッテリーと交換する必要がある。そこで、出発地点から直接目的地へ向かう際の消費電力量に加えて、ステーションを経由して目的地まで向かう際の消費電力量を設定する。

以上の観点から、本研究では実際のタクシーの運行データおよび電力需要量のデータを用いて、EVタクシーの必要電力量および各期の放電効用係数を既知とした場合

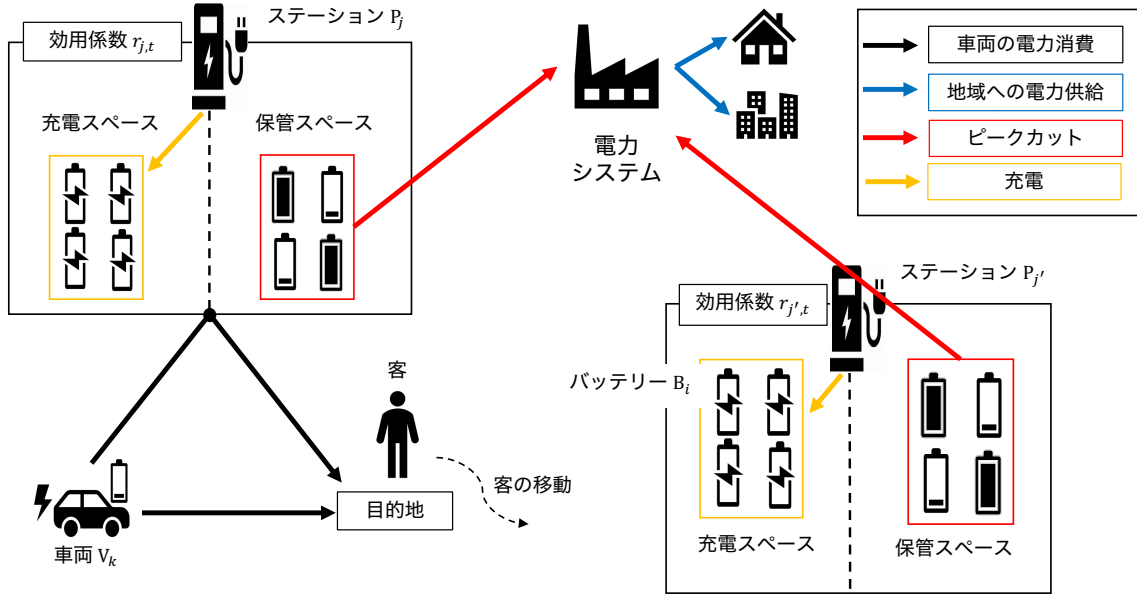


図 3.2: 数理計画モデルの概要

における EV タクシーの運用およびバッテリーの充放電に対する全体最適化モデルを提案する．さらに，これら进行评估することでバッテリー，車両およびステーションの設置個数等の検討を行う．

提案モデルは地域の電力需要などの要件があらかじめ得られている状況において，それらの要件に対するシステムの性能の上界を与える．そのため，個々の EV タクシーが計画期間全体を通して最適な行動をとることを前提とし，実運用に際して発生する EV タクシーの運行パターンや電力需要などの不確実性は考慮しない．

### 3.3.2 数理計画モデル

本節では，数理モデルで用いる記号，定数，変数をそれぞれ定義する．なお全ての変数は非負制約を持つ．

#### 記号

- 期  $t \in \mathcal{T}$
- バッテリー  $B_i$   $(i \in \mathcal{I})$
- ステーション  $P_j$   $(j \in \mathcal{J})$
- 車両  $V_k$   $(k \in \mathcal{K})$
- バッテリーが満充電されている期の集合  $\mathcal{T}^{\text{FC}} \subseteq \mathcal{T}$

- $V_k$  が  $P_j$  への立ち寄りが可能な期の集合  $\mathcal{T}_{j,k}^{\text{VC}} \subseteq \mathcal{T}$  ( $j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}$ )

### 定数

- 目的関数の各項の重み  $w_1, w_2, w_3$ 
  - $w_1$ : ステーションからバッテリーへの充電量にかかる重み
  - $w_2$ : ピークカット後の電力需要量にかかる重み
  - $w_3$ : バッテリーが充電スペースに保管される回数にかかる重み
- $B_i$  の容量  $s_i^{\text{Max}}$  ( $i \in \mathcal{I}$ )
- $B_i$  の最小 SoC  $s_i^{\text{Min}}$  ( $i \in \mathcal{I}$ )
- $B_i$  の初期 SoC  $s_{i,0}$  ( $i \in \mathcal{I}$ )
- $B_i$  の充電速度  $b_i^{\text{C}}$  ( $i \in \mathcal{I}$ )
- $B_i$  の放電速度  $b_i^{\text{D}}$  ( $i \in \mathcal{I}$ )
- $B_i$  の放電ロス係数  $\beta_i$  ( $i \in \mathcal{I}$ )
- $P_j$  の充電バッテリー台数の上限  $n_j^{\text{C}}$  ( $j \in \mathcal{J}$ )
- $P_j$  の保管バッテリー台数の上限  $n_j^{\text{S}}$  ( $j \in \mathcal{J}$ )
- 期  $t$  における  $V_k$  のステーションへ立ち寄る場合の放電量  $a_{k,t}^{\text{V1}}$  ( $k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  における  $V_k$  のステーションへ立ち寄らない場合の放電量  $a_{k,t}^{\text{V2}}$  ( $k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  に  $P_j$  へ放電することへの効用係数  $r_{j,t}$  ( $j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  におけるステーション  $P_j$  の電力需要量  $q_{j,t}$  ( $j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}$ )

### 決定変数

- 期  $t$  における  $B_i$  の充電量  $x_{i,t}^{\text{C}}$  ( $i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  における  $B_i$  の放電量  $x_{i,t}^{\text{D}}$  ( $i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  における  $B_i$  から車両への放電量  $e_{i,t}^{\text{DV}}$  ( $i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}$ )
- バッテリーのステーションと車両間による移動  $u_{j,k,t}$  ( $j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}$ )

$$u_{j,k,t} = \begin{cases} 1 & \text{期 } t \text{ においてバッテリーが } P_j \text{ と } V_k \text{ 間を移動する} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

### 従属変数

- 期  $t$  における  $B_i$  の蓄電量  $s_{i,t}$  ( $i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  における  $V_k$  の放電量  $e_{k,t}^V$  ( $k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  における  $P_j$  から全バッテリーへの充電量  $a_{j,t}^P$  ( $j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  における  $P_j$  から  $B_i$  への充電量  $a_{i,j,t}^{CP}$  ( $i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}$ )
- 期  $t$  における  $B_i$  から  $P_j$  への放電量  $a_{i,j,t}^{DP}$  ( $i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}$ )
- 全期間中のピークカットされた総電力需要量の最大値  $q^M$
- バッテリーとステーションの充電関係  $y_{i,j,t}^C$  ( $i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}$ )

$$y_{i,j,t}^C = \begin{cases} 1 : \text{期 } t \text{ において } B_i \text{ が } P_j \text{ の充電スペースに保管される} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- バッテリーとステーションの給電関係  $y_{i,j,t}^S$  ( $i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}$ )

$$y_{i,j,t}^S = \begin{cases} 1 : \text{期 } t \text{ において } B_i \text{ が } P_j \text{ の給電スペースに保管される} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- バッテリーと車両の接続関係  $z_{i,k,t}$  ( $i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}$ )

$$z_{i,k,t} = \begin{cases} 1 : \text{期 } t \text{ において } B_i \text{ が } V_k \text{ に接続される} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

### 目的関数

本モデルはステーションからバッテリーへの充電量，発電で賄う電力需要量の最大値およびバッテリーが充電スペースに保管される回数の最小化を目的とする．第3項はバッテリーが使用されずステーションに保管されている間に，ステーション内の充電スペースと給電スペース間の無駄な移動を制限することが目的である．

$$\text{Minimize} \quad w_1 \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{j \in \mathcal{J}} r_{j,t} a_{j,t}^P + w_2 q^M + w_3 \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{t \in \mathcal{T}} y_{i,j,t}^C \quad (3.1)$$

## 制約条件

対象問題における制約条件は以下のように表される．なお，以下の制約条件式で示される  $A$  は十分大きな正数とする．

$$s_{i,t} = s_{i,t-1} + x_{i,t}^C - x_{i,t}^D, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.2)$$

$$s_i^{\text{Min}} \leq s_{i,t} \leq s_i^{\text{Max}}, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.3)$$

$$s_{i,t} = s_i^{\text{Max}}, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}^{\text{FC}}) \quad (3.4)$$

$$a_{i,j,t}^{\text{CP}} \leq b_i^C y_{i,j,t}^C, \quad (i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.5)$$

$$x_{i,t}^C = \sum_{j \in \mathcal{J}} a_{i,j,t}^{\text{CP}}, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.6)$$

$$a_{j,t}^{\text{P}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} a_{i,j,t}^{\text{CP}}, \quad (j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} (y_{i,j,t}^C + y_{i,j,t}^S) \leq 1, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} y_{i,j,t}^C \leq n_j^C, \quad (j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} y_{i,j,t}^S \leq n_j^S, \quad (j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.10)$$

$$y_{i,j,t}^C + y_{i,j,t}^S + y_{i,j',t-1}^C + y_{i,j',t-1}^S \leq 1, \quad (i \in \mathcal{I}, j, j' \in \{\mathcal{J} \mid j \neq j'\}, t \in \{\mathcal{T} \mid t \neq 1\}) \quad (3.11)$$

$$a_{i,j,t}^{\text{DP}} \leq b_i^D y_{i,j,t}^S, \quad (i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.12)$$

$$q^{\text{M}} \geq q_{j,t} - \sum_{i \in \mathcal{I}} a_{i,j,t}^{\text{DP}} + a_{j,t}^{\text{P}}, \quad (j \in \mathcal{J}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.13)$$

$$\frac{e_{k,t}^{\text{V}}}{A} \leq \sum_{i \in \mathcal{I}} z_{i,k,t} \leq 1, \quad (k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.14)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} z_{i,k,t} \leq 1, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.15)$$

$$z_{i,k,t} + z_{i,k',t-1} \leq 1, \quad (i \in \mathcal{I}, k, k' \in \{\mathcal{K} \mid k \neq k'\}, t \in \{\mathcal{T} \mid t \neq 1\}) \quad (3.16)$$

$$e_{i,t}^{\text{DV}} \geq e_{k,t}^{\text{V}} - A(1 - z_{i,k,t}), \quad (i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.17)$$

$$e_{i,t}^{\text{DV}} \leq A \sum_{k \in \mathcal{K}} z_{i,k,t}, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.18)$$

$$e_{k,t}^{\text{V}} \geq a_{k,t}^{\text{V1}} - A(1 - \sum_{j \in \mathcal{J}} u_{j,k,t}), \quad (k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.19)$$

$$e_{k,t}^V \geq a_{k,t}^{V2} - A \sum_{j \in \mathcal{J}} u_{j,k,t}, \quad (k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.20)$$

$$\beta_i x_{i,t}^D = e_{i,t}^{DV} + \sum_{j \in \mathcal{J}} a_{i,j,t}^{DP}, \quad (i \in \mathcal{I}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.21)$$

$$u_{j,k,t} = 0, \quad (j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, t \in \overline{\mathcal{T}}_{j,k}^{VC}) \quad (3.22)$$

$$y_{i,j,t}^C + y_{i,j,t}^S + z_{i,k,t-1} - 1 \leq u_{j,k,t}, \quad (i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}_{j,k}^{VC}) \quad (3.23)$$

$$y_{i,j,t}^C + y_{i,j,t}^S + z_{i,k,t-1} - 1 \leq 0, \quad (i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, t \in \overline{\mathcal{T}}_{j,k}^{VC}) \quad (3.24)$$

$$y_{i,j,t-1}^C + y_{i,j,t-1}^S + z_{i,k,t} - 1 \leq u_{j,k,t}, \quad (i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, t \in \mathcal{T}_{j,k}^{VC}) \quad (3.25)$$

$$y_{i,j,t-1}^C + y_{i,j,t-1}^S + z_{i,k,t} - 1 \leq 0, \quad (i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{K}, t \in \overline{\mathcal{T}}_{j,k}^{VC}) \quad (3.26)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} (y_{i,j,t}^C + y_{i,j,t}^S) + \sum_{k \in \mathcal{K}} z_{i,k,t} = 1, \quad (i \in \mathcal{I}, t \in \mathcal{T}) \quad (3.27)$$

### 3.4 検証

本章では、3.3章で与えた数理計画モデルを用いて、シミュレーションによるEVタクシーの運用およびバッテリーの充放電の問題を検討する。本モデルを富山県富山市大沢野地区で実際に運用されているタクシー事業に対して、ガソリンタクシーをEVタクシーに置き換えた場合について検討する。

#### 3.4.1 シミュレーション設定

本節では本モデルにおいてあらかじめ与えられる定数の設定を行う。

##### 基本パラメータの設定

3.3節のモデルにおいて問題規模などの基本的なパラメータを以下のように設定する。今回の検証ではバッテリーの仕様は全て同じとする。期 $t$ の長さは、EVタクシーのバッテリーの交換にかかる時間が約15分であるため、ステーションへ立ち寄る時間を考慮し30分とした。ステーション数について、本検証では富山県富山市大沢野地区を対象としており、また、一つの地域内においてEVタクシーがどのステーションで充放電を行なっても地域の電力需要に同様の影響を与えるため、1箇所とした。車両数について、車両数を増やすと計算量が増大するため、類似の経路をたどる複数のEVタクシーを1台と見なし、バッテリー容量を大きく設定し、実際の運行ログの運行パターンも踏まえ、3台とした。バッテリー数について、EVタク

シーが必要な時にバッテリーを交換できるように、車両 1 台に対して EV に接続するバッテリー、交換用のバッテリー、充電中のバッテリーを考慮した 3 個とし、合計 9 個とした。

- 期  $t (\in \mathcal{T}) = 1, 2, \dots, 102$ 
  - 1 期あたり 30 分、1 日目の 21 時から 3 日目の 24 時までを運用期間とする
- バッテリーが満充電されている期  $t (\in \mathcal{T}^{\text{FC}}) = 6, 54, 102$ 
  - 1 日目、2 日目、3 日目の 24 時の時点で全てのバッテリーが満充電されている
- バッテリー  $i (\in \mathcal{I}) = 1, 2, \dots, 9$
- ステーション  $j (\in \mathcal{J}) = 1$
- 車両  $k (\in \mathcal{K}) = 1, 2, 3$

### EV タクシーの電力需要量

EV タクシーの電力需要量は実際の運行データを基に与える。EV タクシーの運行データの例を表 3.1 に示す。この緯度、経度の軌跡から各 EV タクシーの走行距離を算出し、各期の電力需要量を求める。タクシーの運行データは 1 分ごとに取得した。走行距離から電力量を算出する際、1kWh あたり 6km 走行できるとした。また、EV タクシーがいつステーションに立ち寄ったか不明なため、全てのデータをステーションに立ち寄らない場合の電力需要量  $a_{k,t}^{\text{V2}}$  として扱う。EV タクシーの状態について、客を乗せている状態の「実車」と乗せていない状態の「空車」が存在する。また、1 期の間全て「空車」である場合にのみステーションに立ち寄ることが可能とする。ステーションに立ち寄る場合と立ち寄らない場合の EV タクシーの電力需要量の概念を図 3.3 に示す。ステーションに立ち寄る場合はバッテリーを交換し、これを表わす変数  $u_{j,k,t}$  が 1 となる。ステーションに立ち寄る場合の消費電力は、式 (3.28) のように定義する。

$$a_{k,t}^{\text{V1}} = a_{k,t}^{\text{V2}} + 1 \quad (3.28)$$

### 地域の電力需要量と放電効用係数

表 3.2 に対象地区の電力需要の例を示す。この電力需要を 1 期ごとの電力需要量  $q_{j,t}[\text{kWh}]$  に換算する。各期の放電効用係数  $r_{j,t}$  は、電力需要量を 0.5～1.5 の範囲で正規化したものを使用する。

表 3.1: タクシーの運行データ

車両	時刻	状態	緯度	経度
A	2018/6/8 14:00	乗車	36.59936	137.20633
A	2018/6/8 14:00	乗車	36.59897	137.20636
C	2018/6/8 14:01	乗車	36.57819	137.20911
C	2018/6/8 14:01	乗車	36.57819	137.20911
C	2018/6/8 14:01	迎車	36.57819	137.20911
C	2018/6/8 14:01	乗車	36.57819	137.20911
B	2018/6/8 14:01	休憩	36.57458	137.21075
A	2018/6/8 14:01	乗車	36.59355	137.20672

### 3.4.2 結果

本論文では、電力需要の特徴が異なる夏と冬のデータを用いてバッテリーの容量を変更して検証する。今回の検証ではピークカット効果が得られることを確認するため、バッテリーの充放電速度を容量に応じて変更する。具体的には1期で容量の80%を充放電可能とした。シミュレーションツールとして ILOG CPLEX<sup>25)</sup> を使用した。

夏のデータを用いたシミュレーションを行い、提案モデルの妥当性を確認する。計算機実験に際しては、主に計算量削減の観点から、同じような交通行動をとる複数台のタクシーを3.3.2節における車両  $V_k$  の1台として扱うものとし、 $V_k$  に接続されるバッテリーの容量  $s_i^{\text{Max}}$  をそれぞれ4000kWhに設定する。図3.4にバッテリーの蓄電量、図3.5にバッテリーの状態を示す。バッテリーの状態はEVに放電、ピークカットのため地域に放電、充電、ステーションに保管の4つが存在する。電力需要が大きい時間帯に地域へ電力を供給し、電力需要が小さい時間帯に充電している。図3.4、図3.5より充電によって電力需要のピーク値が増大しないように時間をずらしていることがわかる。加えて、バッテリーの状態がEVに放電、地域に放電、充電、保管のいずれかの一状態をとっていることが確認できる。EVタクシーが運行している時間帯ではバッテリーが接続されており、全体として適切な挙動となっていることから、提案モデルは妥当であると言える。

バッテリーの容量を変更することによるピークカットへの影響を確認する。各バッテリーの容量はある程度現実的な容量の100kWhに加え、1,000kWh, 2,000kWh, 3,000kWh, 4,000kWhで検証する。夏のデータを用いてシミュレーションを行う。

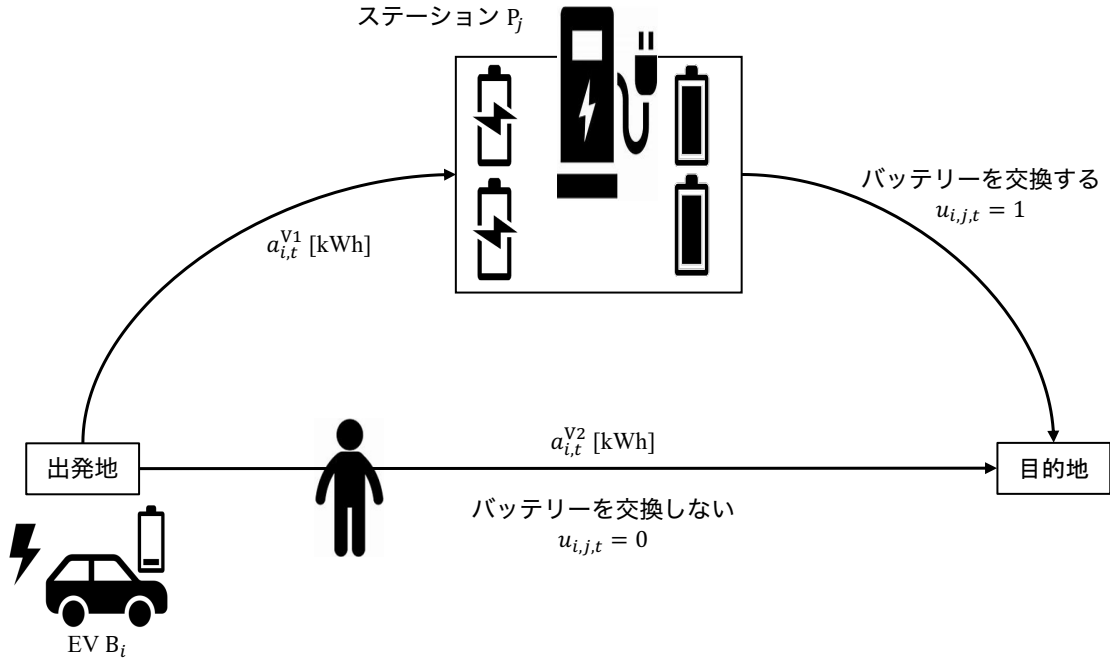


図 3.3: タクシーの電力消費

図 3.6 にバッテリーの容量ごとの電力需要のピーク値を示す．ここで式 (3.1) で表される目的関数の各項にかかる重みは，それぞれ最適化の際に各項をどれだけ重要視するかを定義するものである．まず，各項の目的関数値の大きさを踏まえ， $w_1 = 1$ ， $w_2 = 10$  と設定したところ，バッテリーの容量が 1,000kWh 以上ではピークカットの効果が変わらなかった．目的関数の第 2 項が表すピークカットのためには，バッテリーを充電する必要がある一方で，第 1 項の充電コストを押し上げる効果をもつ．このようなトレードオフ関係を確認するために， $w_2 = 100$  に増加させたところ，ピークカットの効果が大きくなっていることが確認された．以上より，本提案モデルにより，なんらかの重み設定の下で，ピークカットの程度とそれに必要なバッテリー容量並びに運用パターンを示せることがわかる．つまり本論文が想定するサービスのもたらす効果をあらかじめ定量化でき，その実現可能性に寄与することが期待される．

次に季節によるピークカット効果の違いを確認するため，冬のデータを用いたシミュレーションを行い夏の結果と比較する．目的関数の重みを  $w_1 = 1$ ， $w_2 = 100$  とした．図 3.7 に夏と冬におけるバッテリー容量ごとの電力需要のピーク値を示す．夏は容量が 2,000kWh のバッテリーを導入することで電力需要のピーク値は約 3,000kWh 下げることが可能であることが示された．一方で冬は容量が 4,000kWh のバッテリーを導入しても電力需要のピーク値は約 2,500kWh 分しか削減されないこ

表 3.2: 地域の電力需要データ

時刻	電力需要 [kW]
2018/10/1 11:43	28,560
2018/10/1 11:44	28,510
2018/10/1 11:45	28,460
2018/10/1 11:46	28,400
2018/10/1 11:47	28,350
2018/10/1 11:48	28,290
2018/10/1 11:49	28,230
2018/10/1 11:50	28,170

とがわかった。バッテリー容量ごとのピークカット後の電力需要量を 図 3.8a, 3.8b に示す。夏より冬の方が電力需要が大きい時間帯が長く、得られるピークカット効果に対してより多くの充電が必要となり、充電量の方が目的関数に大きく影響するためピークカット効果が小さいと考えられる。

### 3.5 おわりに

本章では現実のタクシー事業を対象にタクシーを EV に置き換え、スマートグリッドに導入した場合に得られる効果を確認した。カートリッジ式の EV バッテリーを想定し、数理計画モデルとして定式化し、シミュレーションによって EV タクシーの交通需要を満たしつつ、バッテリーの充電による系統電力への負荷の軽減と V2G の可能性について解析した。一方で、V2G について、効果的な運用にはバッテリー数や容量の増加が課題となることがわかった。これらの検討によって数理計画モデルを用いた社会システムの運用に関するシミュレーション・評価の可能性が示された。

今後の課題として、様々な地域における EV タクシーや電力需要量に対する有用性の評価が必要である。加えて、本論文では計算量を削減するためバッテリー数や車両数を減らし、バッテリー容量を増大させて検証したが、車両の充電に関する利便性やそれに伴う運行計画への影響について今後検討したい。また、一般家庭の太陽光発電によって生じた余剰電力を、EV の充電や他の家庭へ供給するサービスにも応用していきたい。

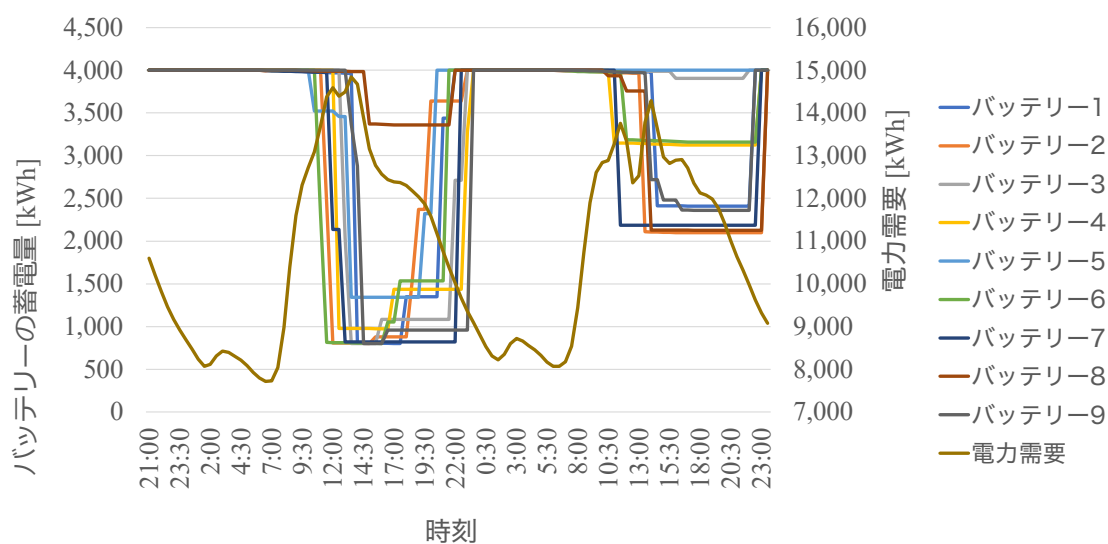


図 3.4: バッテリーの蓄電量

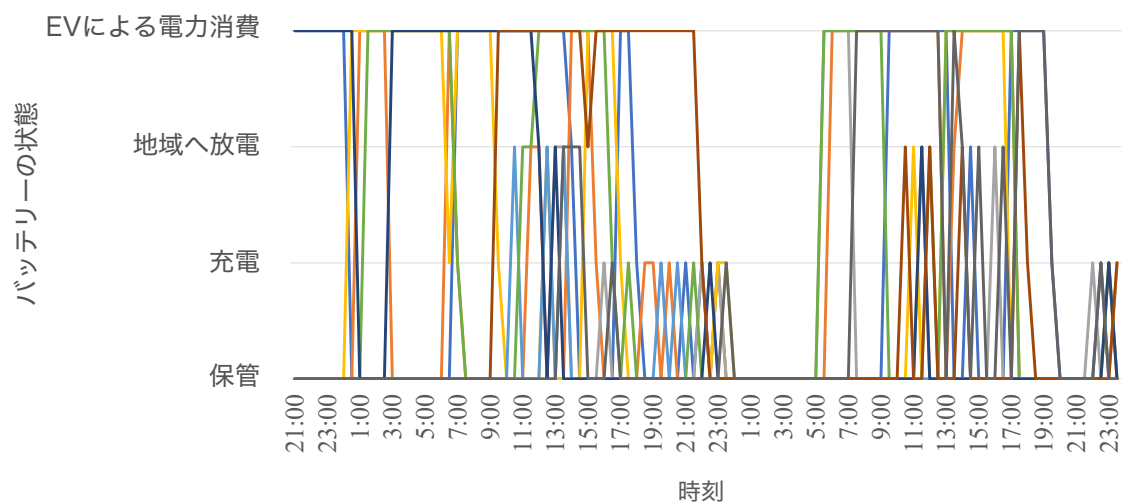


図 3.5: バッテリーの状態

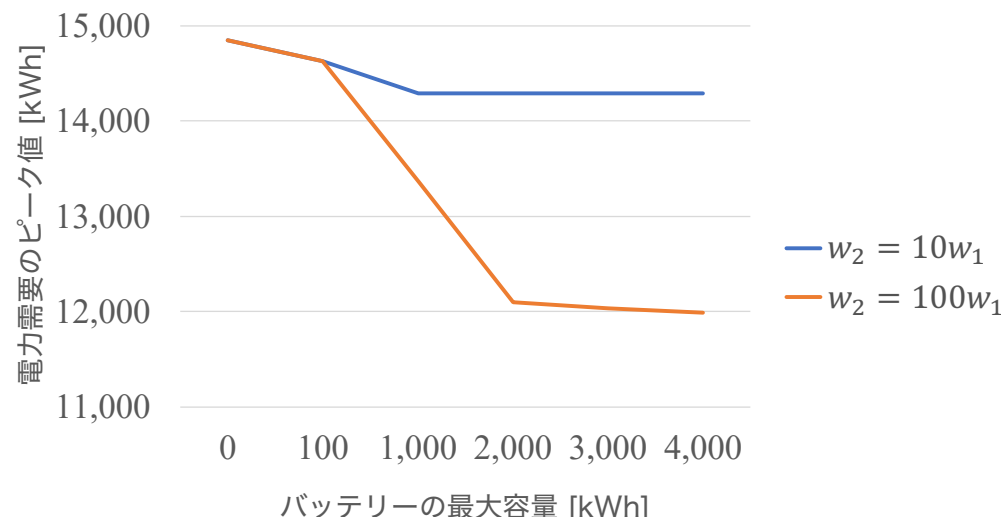


図 3.6: 夏のピークカット効果

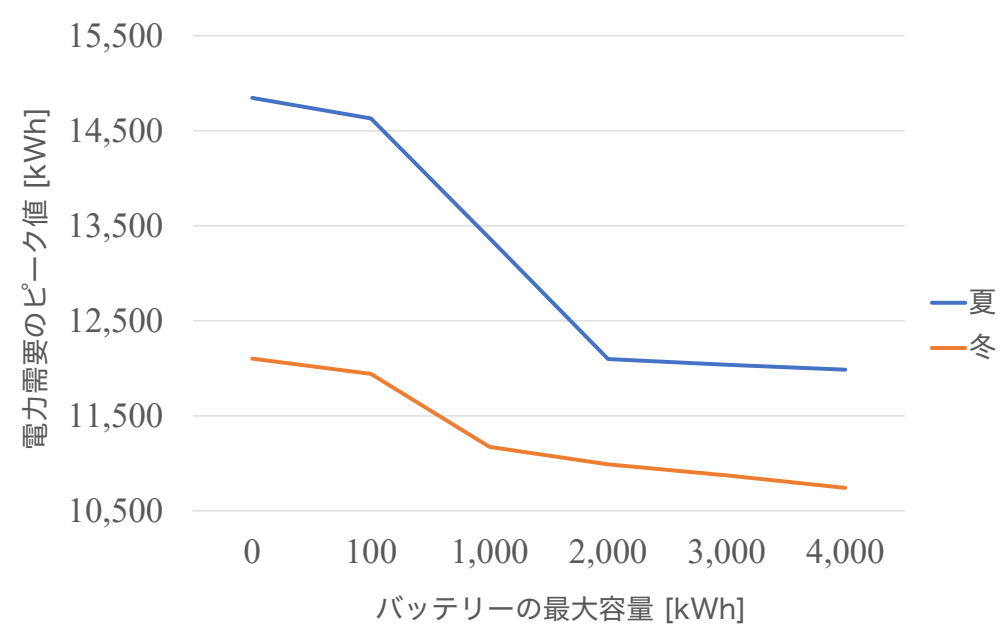
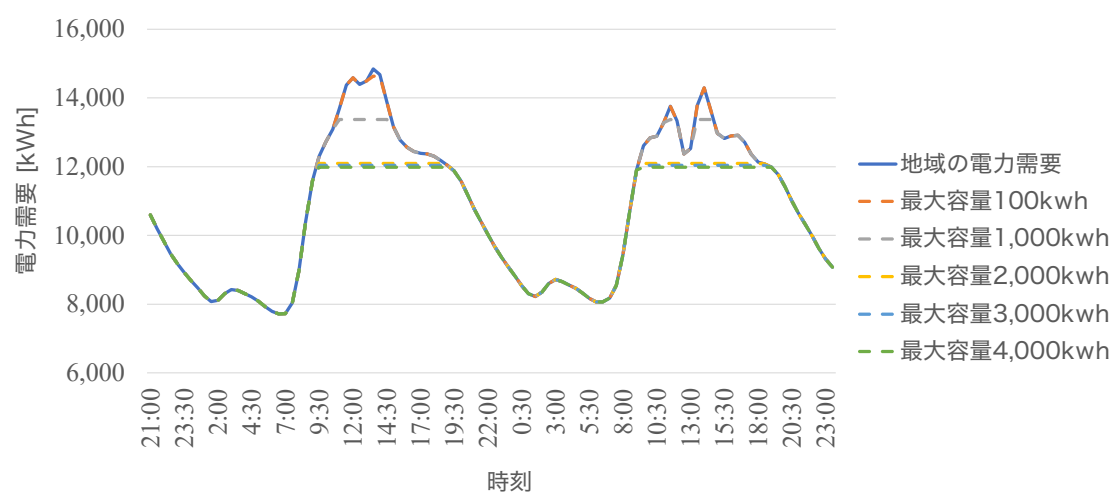
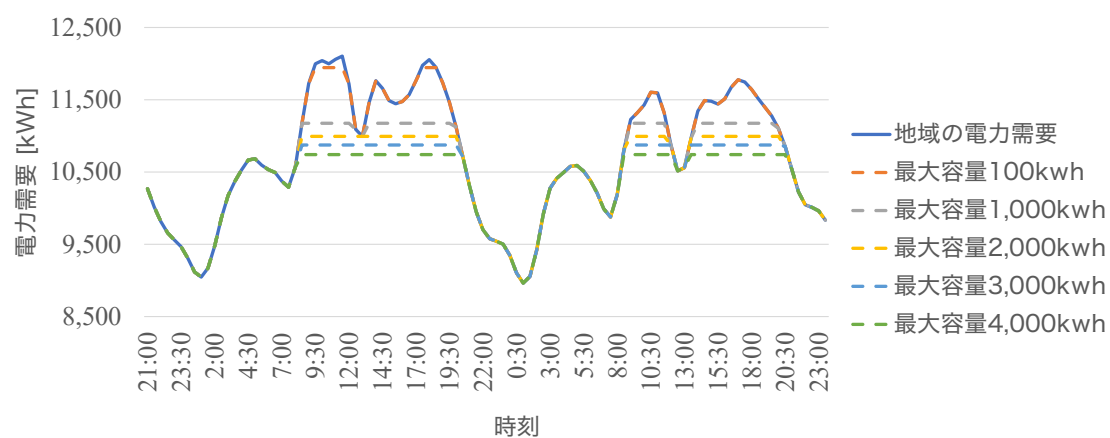


図 3.7: 夏と冬のピークカット効果の比較



(a) 夏



(b) 冬

図 3.8: 夏と冬の電力需要とピークカット効果



## 第 4 章

# メタヒューリスティクスと数理計画法を組み合わせたごみ収集サービスに対する最適化手法と評価

本章では既存の社会システムであるごみ収集サービスを取り上げ、メタヒューリスティクスと組み合わせた手法を用いたシミュレーションについて検討する。

### 4.1 はじめに

2013 年以降、日本のごみ収集・運搬サービスにかかるコストは増加傾向にあり、2019 年度以降のごみ処理にかかる行政コストは 2 兆円を超える<sup>26)</sup>。国内で排出されるごみの約 7 割が一般家庭から排出されており、財政状況がひっ迫する地方自治体においてはごみの収集・運搬に係るコストの低減が喫緊の課題となっている。現在のごみ収集・運搬サービスにおいては、専用のごみ袋に手数料を上乗せして販売することでごみ処理コストの一部を住民に負担させている自治体がある<sup>27)</sup>。

本研究で対象とする富山県南砺市において、一般家庭から排出されたごみが一時的に蓄積されるごみステーション (以下、ステーションと呼ぶ) が過剰に設置されており、ごみの収集・運搬コストが大きくなっている。そのため、南砺市ではごみ収集・運搬サービスのさまざまな見直しを行っている。その中で、ステーションの位置や数を変えたり、現在の収集・運搬ルートが適切であるかなどの検討を行っている。そこで本研究では筆者らが提案したステーション配置最適化手法<sup>28)</sup>と収集・運搬ルート最適化手法<sup>29)</sup>を基にした、ステーション配置と収集・運搬ルートの同時最適化によって収集・運搬コストを削減することを目的とする。メタヒューリスティクスによってステーション配置の近傍解を探索することによって収集・運搬コストが小さい配置の導出を目指す。ステーションの配置を変更する場合、ステーションの廃止コストと新たなステーションの設置コストがかかる。ただし、これらのステー

ションの移設にかかるコストは地域やステーションの規模などの様々な要因によって変動する。他にも住民への説明の必要性の有無など、様々なコストが考えられる。従って、ステーションの移設にかかるコストを定義することは難しい。よって本研究では、ステーションの移設にかかるコストは考慮しないものとし、自治体のごみ収集・運搬サービスの見直しを行う際の判断材料の一つとして、ステーション配置や収集・運搬ルート最適化・評価を行う手法を提案するものとする。

ステーションの再配置には住民の利便性を考慮する必要がある。対象地域の住民に対してごみ捨ての状況や意識に関するアンケートを実施した。本アンケートではその世帯のごみを捨てる際の交通手段、住宅からステーションまでの距離、現在のステーションの位置で満足しているか等のさまざまな質問に対して回答を得た。このうち現在のステーションまでの距離と、この距離が延びる場合に許容できる最大距離の2項目を用い、対象地域に住む各世帯にごみを捨てに行く許容範囲を設定する。この範囲内にステーションが存在するようにステーション配置を作成する。作成したステーション配置を基にごみの収集・運搬ルートを作成し、収集・運搬コストを算出する。収集・運搬ルートの作成に際して正確な収集・運搬コストを算出するため、OpenStreetMap<sup>30)</sup>を基に作成した現実の道路ネットワークを反映する。

## 4.2 ごみ収集・運搬サービス

ごみステーションの数・配置を変えればその都度最適ルートも変わってくる。本研究では最短経路問題から導出される収集・運搬コストを評価値として、ごみステーションの数・配置を最適化する。そこで、対象問題を図4.1に示すようなステーション配置問題と収集・運搬ルート問題の2段階の問題と捉える。図4.1における実線のステーション候補地はステーション配置問題において採用された候補地であり、収集・運搬ルート問題において巡る対象となる。

### 4.2.1 ステーション配置

ステーション配置問題では、ステーションの配置候補地(以下、候補地)を多数用意しておく。その中から全ての住民のごみを捨てることのできるような制約の下、採用する候補地を選択する。以下にステーション配置に関わる要素および要件を整理する。

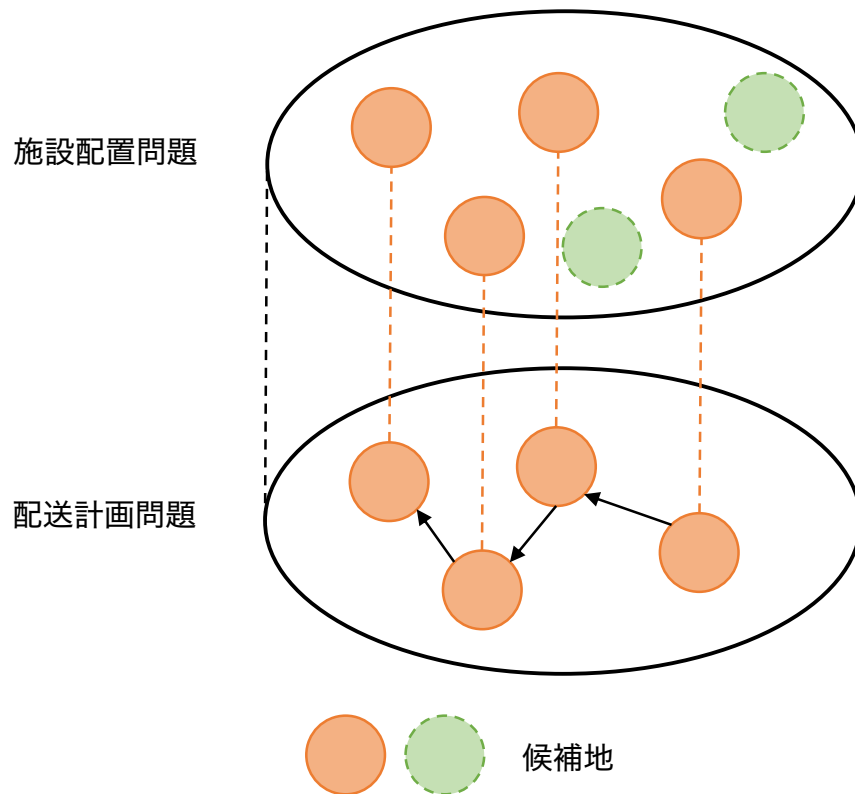


図 4.1: ごみ収集サービスの問題構造

### 候補地

一般家庭から排出されたごみを一時的にためておく場所であるステーションを配置する候補地を指す。あらかじめ多数の候補地を設定しておき、この中から採用する候補地を選択する。

### 世帯

対象の地域内に居住し、ごみをステーションに排出する一般家庭を世帯とよぶ。各世帯はごみを捨てに行くことができる範囲を持ち、これを許容領域とよぶ。許容領域の設定にあたっては、事前に実施した住民アンケートの結果を用いる。

### アンケート

本研究で用いるアンケートの質問項目を図 4.2, 図 4.3 に示す。本研究で対象とする地区内に住む全ての世帯に対してアンケート用紙を配布し返送してもらう方式で実施した。配布数は4,281部、回収数は2,066部であり、回収率が48%であった。図

【7】 自宅の玄関からごみ集積所までの距離として当てはまるものを下記から選んで☑をいれてください。（おおまかで結構です）

＜可燃ごみの集積所までの距離＞

<input type="checkbox"/>	50m 以下	<input type="checkbox"/>	51m ～ 100m	<input type="checkbox"/>	101m ～ 150m
<input type="checkbox"/>	151m ～ 200m	<input type="checkbox"/>	201m ～ 250m	<input type="checkbox"/>	251m 以上

＜資源、不燃ごみの集積所までの距離＞

<input type="checkbox"/>	50m 以下	<input type="checkbox"/>	51m ～ 100m	<input type="checkbox"/>	101m ～ 150m
<input type="checkbox"/>	151m ～ 200m	<input type="checkbox"/>	201m ～ 250m	<input type="checkbox"/>	251m 以上

図 4.2: 現在のステーションまでの距離に関する質問

4.2 の質問に対する回答を地域別に集計した結果を図 4.4 に、図 4.3 の質問に対する回答を現在のステーションまでの距離別に集計した結果を図 4.5 に示す。本論文では可燃ごみのみを検証対象とするため、可燃ごみの集計結果のみを示す。本アンケートでは回答者の居住している地区名、現在のステーションとの距離、現在のステーションとの距離が延びる場合に許容できる距離が回答として得られている。これらの距離を許容領域の半径に設定する。

#### 4.2.2 収集・運搬ルート

収集・運搬ルート問題では、巡る対象のステーションをどの順で巡るかを決定する。ごみ収集車 1 台が巡るルートは 1 つとし、ごみ収集車の台数分のルートを作成する。ごみ収集車は収集・運搬業者の拠点から決められたステーションを順に巡りごみ処理場へ向かう。以下に収集・運搬ルートに関わる要素および要件を整理する。

##### ステーション

ステーションとは、一般家庭から排出されたごみを一時的にためておく場所（ごみ集積所）のことである。ステーション配置問題において採用された候補地のことである。ステーションに排出されるごみの量は南砺市から入手した年間ごみ排出量を基に平均値を算出し、地域内の全てのステーションにおいて同じ値を用いる。

- 【17】 自宅の玄関からごみ集積所までの距離が増えるとしたら、何 m まで増えることを許容できますか。下記から選んで☑をいれてください。

＜可燃ごみの集積所までの距離＞

<input type="checkbox"/>	0m	<input type="checkbox"/>	10m	<input type="checkbox"/>	20m
<input type="checkbox"/>	30m	<input type="checkbox"/>	40m	<input type="checkbox"/>	50m
<input type="checkbox"/>	60m	<input type="checkbox"/>	70m	<input type="checkbox"/>	80m
<input type="checkbox"/>	90m	<input type="checkbox"/>	100m	<input type="checkbox"/>	110m 以上

＜資源・不燃ごみの集積所までの距離＞

<input type="checkbox"/>	0m	<input type="checkbox"/>	10m	<input type="checkbox"/>	20m
<input type="checkbox"/>	30m	<input type="checkbox"/>	40m	<input type="checkbox"/>	50m
<input type="checkbox"/>	60m	<input type="checkbox"/>	70m	<input type="checkbox"/>	80m
<input type="checkbox"/>	90m	<input type="checkbox"/>	100m	<input type="checkbox"/>	110m 以上

図 4.3: 許容できるステーションまでの増加距離に関する質問

### ごみ収集車

ごみ収集車は出発地点から順に決められたステーションを巡りごみ処理場へ向かう。ごみ処理場から出発地点へ戻る時間はルートによらず同じであるため考慮しない。ごみの収集・運搬にあたりごみ収集車には積載可能なごみの量の上限 (3.2t) が存在するため、1 台のごみ収集車が巡ることのできるステーション数には限りがある。

### 収集・運搬コスト

ごみの収集・運搬にかかるコストは、人件費、ごみ収集車のガソリン代および維持管理費の合計とする。この収集・運搬コストが小さくなるように収集・運搬ルートを作成する。

### 4.2.3 関連研究と本研究の位置づけ

本研究では施設配置問題と配送計画問題を扱う。施設配置問題を扱った関連研究として、例えば、鈴木による研究<sup>31)</sup>では、小学校および投票所の統廃合を対象として、既存施設を基に施設の廃止と新設を同時に考慮した施設配置モデルを提案している。柳本らによる研究<sup>32)</sup>では、行政による都市計画の支援を目的として、遺伝的

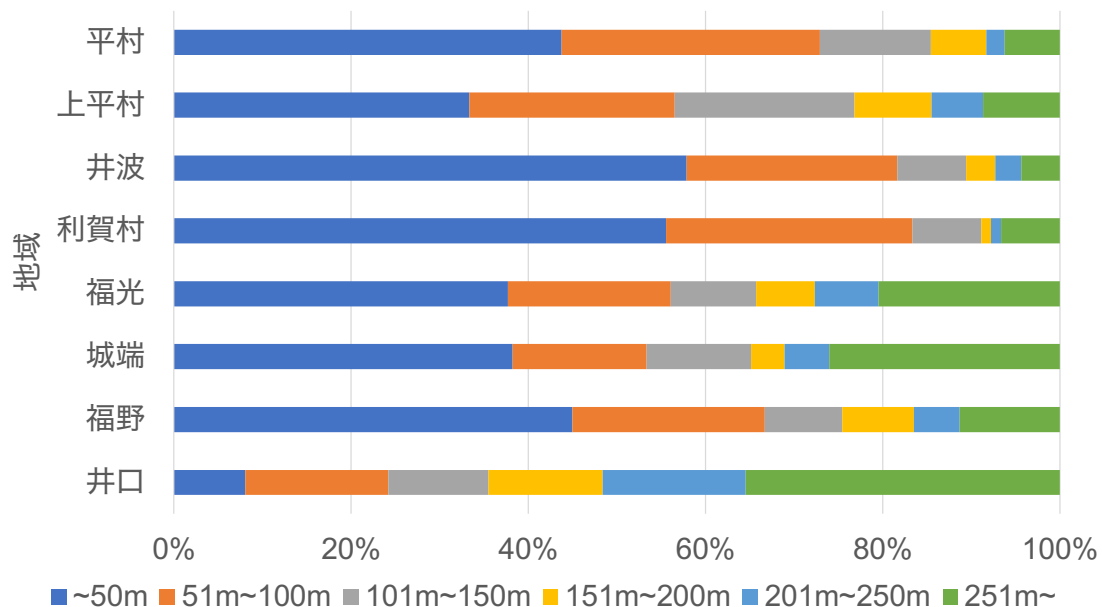


図 4.4: 現在のステーションまでの距離に関する質問への回答

アルゴリズムを用いた都市計画支援システムを提案している．このシステムでは、住民が感じる快適度を距離に応じて数値化し配置を評価している．

収集・運搬ルートに関する研究として、例えば、小泉らによる研究<sup>33)</sup>では、ごみの発生量の不確実性を含む配送計画問題に対してファジィ線形計画法を適用し、ごみの発生量の曖昧さも考慮して、経済性を向上させ、同時に安全性の確保も満足するような収集輸送モデルを提案している．一方藤野らによる研究<sup>34)</sup>では、動的計画法を用いてステーション間の最短経路を算出し、遺伝的アルゴリズムにより収集車の稼働時間ができるだけ等しくなるような計画を導出している．松中らによる研究<sup>35, 36)</sup>では、廃棄物の収集・運搬の最適化だけでなく、焼却場等の関連施設の配置を遺伝的アルゴリズムを用いて同時に最適化している．この研究では実際の道路を対象として収集・運搬経路を作成している．一般的な配送計画問題としては、例えば、Yeun らの論文<sup>37)</sup>が示すように、配送車に容量制限が存在する問題やタイムウィンドウ制約が存在する問題など、多く存在する．

施設配置と配送計画の両方を扱った関連研究として、Barreto らによる研究<sup>38)</sup>では、配送センターから顧客に商品を配送するサービスに対して、クラスター分析を用いたヒューリスティック手法によって配送センターの位置と配送ルートを最適化している．また、Hachicha らの研究<sup>39)</sup>では移動型医療サービスのような問題を対象として、あらかじめ決められた候補地の中から訪問する拠点を選択し、ルートを生成する手法を提案している．訪問する拠点の選択において、対象地域内に点在す

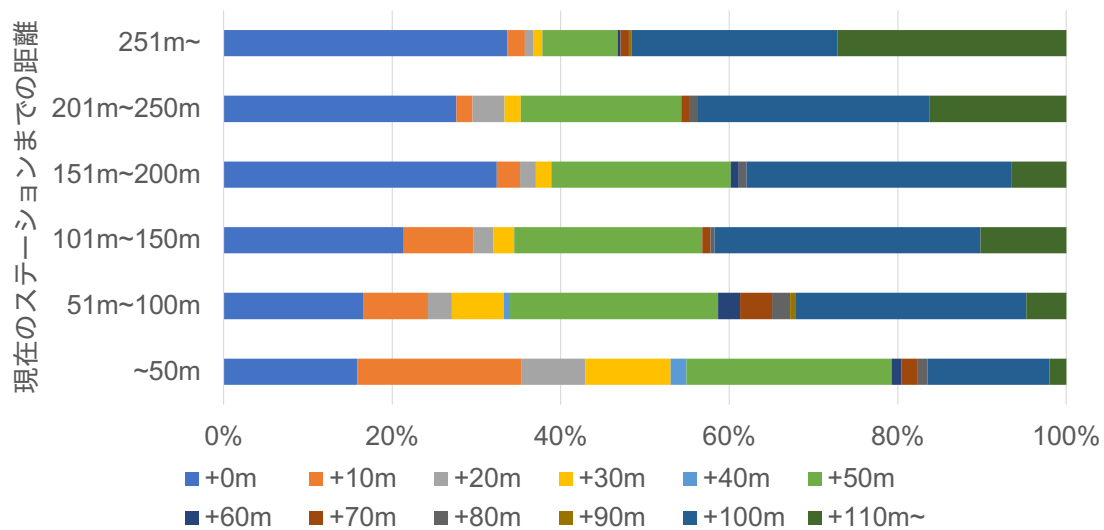


図 4.5: 許容できるステーションまでの増加距離に関する質問への回答

る複数の地点がルートからの徒歩圏内である必要がある。この論文では、必ず訪問する拠点のみを巡るルートを生成し、その後、任意に訪問する拠点を追加したり、削除することで訪問する拠点の選択とルートを最適化している。

その他のごみ収集・運搬サービスを扱った関連研究として、立花らによる研究<sup>40)</sup>では、一般廃棄物のリサイクルに重点を置き、政策面、経済面および産業面、教育面にまで視野に入れた幅広い範囲での総合的な検討が必要であるとしている。このような背景のもと、効率的かつ合理的に廃棄物処理を行うため、個々のステーションを巡り中継地点までごみを運搬するコストを算出するゾーンレベルのモデル、各ゾーンで収集したごみをまとめて処理施設に運ばれるごみ量を算出するエリアレベルのモデル、ごみ処理施設の建設費用や耐用年数などを考慮した建設計画を作成するモデルなどを用いて、ごみの排出量やごみの量などの分析を行なっている。

これらのように収集・運搬ルートや収集・運搬コスト、環境に与える影響を評価した研究は多く存在する一方で、住民がごみを排出するステーションの配置問題を対象とした研究は少ない。また、巡る地点の選択とルートの生成を同時に行う問題を対象とした研究は見られるが、本研究が扱う問題では具体的な候補地点が存在せず、必ず巡る地点も存在しない。さらに、巡る地点の選択に関して、世帯とステーション間の距離はアンケートを基に異なる値が設定される。そこで、本研究では収集・運搬ルートを考慮しながらステーション配置を最適化することを目指す。

### 4.3 メタヒューリスティクスを用いたステーション配置と収集・運搬ルートの同時最適化

収集・運搬コストは収集・運搬ルートに依存して決まり、ステーション配置が関係するのは移動時間（距離）である。そのため、配置するステーションが少ない方が移動時間が短く、収集・運搬コストが小さくなると考えられる。そこで、ステーション配置問題においてはステーション配置数が最小となる配置を作成する。この際、ステーションの配置数が最小となる配置は複数存在することが考えられる。その中でも収集・運搬コストが小さい配置を導出するため、メタヒューリスティクスを用いてステーション配置を最適化する方法を検討する。作成したステーション配置に対して、一部のステーションを移動することでより良い配置を探索する。この際、1ヶ所のステーションを移動して改悪解となる場合でも、複数のステーションを移動させることにより、改良解が見つかる可能性がある。一方で、複数のステーションを同時に移動させる場合、近傍がいたずらに複雑化することが予想される。そこで、1ステップに移動させるステーションを1ヶ所とし、改悪解を許容する焼きなまし法 (SA: Simulated Annealing)<sup>41)</sup> を用いてステーション配置を最適化する方法を検討する。初期解とその評価値となる収集・運搬コストを筆者らが以前提案した手法<sup>29, 28)</sup>によって作成する。

#### 4.3.1 ステーション配置問題のモデル化

SAの初期解を得るためにステーション配置数が最小となるステーション配置を作成する。ここでは先行研究<sup>28)</sup>に示す手法を用いる。本研究で対象とする地域ではごみ収集・運搬サービス全体のさまざまな検討を行っている段階であり、具体的にステーションの配置候補地が存在するわけではない。そこで、対象地域においてステーションの配置候補地を50m間隔の格子状に設定し、この中から最適な候補地を選択することによってステーション配置を作成する。なお、候補地の数は本論文の検証で対象とする福野地区では4万ヶ所以上を設定した。ステーションは住民が直接利用するため、住民の利便性を考慮する必要がある。そこで、4.2.1節に示した住民アンケートを基に許容領域を対象地域内に住む世帯に設定する。そして、これを制約条件とした集合被覆モデルとしてステーション配置問題をモデル化する。ここで用いる集合被覆モデルでは、対象地域内に住む世帯を被覆要素として、全ての世帯の許容領域内にステーションが存在するようにステーション配置候補地を選択する。この際、様々な事情によりモデルで決定した場所にステーションを設置できな

い場合も考えられるが、候補地は 50m 間隔で配置しているため、実際には  $\pm 25\text{m}$  程度の範囲内に設置するものとする。

以下に用いたモデルを示す。

#### 記号

- 候補地  $v \in \mathcal{V}$
- 世帯  $j \in \mathcal{J}$

#### 定数

- ステーションの利用世帯数の上限  $N$  (現在の平均利用世帯数の 1.5 倍程度)
- 世帯の許容領域と候補地の関係  $h_{v,j}$  ( $v \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}$ )

$$h_{v,j} = \begin{cases} 1 : \text{世帯 } j \text{ の許容領域内に候補地 } v \text{ が存在する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

#### 決定変数

- 候補地  $v$  の採用  $y_v$  ( $v \in \mathcal{V}$ )

$$y_v = \begin{cases} 1 : \text{候補地 } v \text{ を採用する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 世帯によるステーションの利用  $z_{v,j}$  ( $v \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}$ )

$$z_{v,j} = \begin{cases} 1 : \text{世帯 } j \text{ が採用された候補地 } v \text{ を利用する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

#### 目的関数

ステーションの配置数最小化を目的とする。妥当な目的関数として他にはステーションの移設・廃止・新設などにかかるコストが考えられるが、場所や規模によってコストが異なり、また規模についてはそのステーションを利用する人数などによっても変わるため定義が難しいため、単純に配置数の最小化とした。自治体のごみ収集サービスに関して様々な検討に活用することを想定しているため、ある程度計算量が抑えられる方が良いと考えた。

$$\text{Minimize} \quad \sum_{v \in \mathcal{V}} y_v \quad (4.1)$$

### 制約条件

以下に制約条件を示す.

- 各世帯は許容領域内に存在するステーションのみを利用可能

$$z_{v,j} \leq h_{v,j}y_v, \quad (v \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{J}) \quad (4.2)$$

- 各ステーションの利用可能世帯数の上限

$$\sum_{j \in \mathcal{J}} z_{v,j} \leq N, \quad (v \in \mathcal{V}) \quad (4.3)$$

- 各世帯が利用するステーションは1つ

$$\sum_{v \in \mathcal{V}} z_{v,j} = 1, \quad (j \in \mathcal{J}) \quad (4.4)$$

アンケートには個人情報を含むため、どの世帯がどの回答をしたかがわからない。そこで、アンケートの回答と地域に住む世帯を紐づける必要がある。具体的には以下の手順に従い世帯に回答を紐づけた。

- (1) 地図上の世帯  $j$  と最寄りのステーションとの距離を  $d_j$  とする。
- (2) 回答の中から現在のステーションとの距離が  $d_j$  と回答しているものを抽出する。
- (3) 手順(2)で抽出した回答の中からランダムに世帯  $j$  に回答を紐づける。紐づけた回答は破棄することなく他の世帯での操作時にも選択肢として残す。
- (4) 全ての世帯に対して(1)~(3)を実行する。

ここで定数  $h_{v,j}$  は4.2.1節に示すように世帯と候補地の直線距離に基づき定義する。

ステーション配置を図4.6のように表現する。0が採用しない候補地、1が採用する候補地を示す。メタヒューリスティクスを用いてステーション配置を作成する際、現実の配置を反映した表現の方が近傍の定義が容易であるため、関連研究<sup>32)</sup>にも用いられるような二次元表現を用いる。

### 4.3.2 収集・運搬ルート問題のモデル化

ステーション配置の評価値である収集・運搬コストを算出するため、ステーション配置問題を解いて得られたステーション配置に対する収集・運搬ルートを作成する。初期解の評価値となる収集・運搬コストは、4.3.1節に示した方法で作成したステーション初期配置に対して、先行研究<sup>29)</sup>に示す手法を用いて算出する。本問題は

0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0

1: 採用  
0: 不採用

図 4.6: ステーション配置の解表現

容量制約付き配送計画問題と見なすことができる．このような問題に対しては近傍探索などの解法が考えられる．しかし本研究ではステーション配置が変更されるたびに収集・運搬ルートを作成し直す必要がある．そこで先行研究<sup>29)</sup>に示す集合被覆モデルによる方法を用いて計算量の削減を図る．対象問題ではステーションとごみ収集車が複数存在するため，計画全体でのごみ収集車の巡る実行可能なルートの組み合わせは膨大な数になる可能性があり，最適化に要する計算時間も膨大になると予想される．そこで，実行可能かつ良好な複数の部分ルートをあらかじめ生成し，その中から全てのステーションを被覆するルートを選択するような集合被覆モデルとして表わす．具体的には，あらかじめ生成するルートに最大収集時間を制約条件として設定し，短時間でステーションを回る高品質な部分ルートのみを一定数生成する．生成された部分ルート集合の中から最適なルートを選択することで計算時間の短縮と収集・運搬コストの削減を図る．またルートの生成と選択を分離することにより，何らかの理由によって使用できないルートはあらかじめ候補ルートから除外できる点も利点として挙げられる．

候補ルート集合は，以下に示すルート生成手法によって作成する．

#### 記号

- 候補ルート  $r \in \mathcal{R}$
- 候補ルート  $r$  において  $k$  番目に巡るステーション (出発地点とごみ処理場を含む)  $k \in \mathcal{K}_r$

## 定数

- ごみ収集車の最大稼働時間  $T^M$
- ステーションでの作業時間  $t^W$
- ステーション  $k$  から  $k+1$  までの移動にかかる時間  $t_{k,k+1}$  ( $k \in \mathcal{K}_r$ )
- ごみ収集車の最大積載容量  $Q^M$
- 1ヶ所のステーションで収集するごみの量  $q$

ステーションでの作業時間  $t^W$  は参考文献<sup>42)</sup>を基に、ごみ収集車が停止してからごみの積み込みを開始するまでの準備時間 16.7s と、ごみの積み込み時間の和とし、以下のように定義する。ごみの積み込みにかかる時間は積み込み速度 0.77kg/s と収集するごみの量の乗算とする。

$$t^W = 16.7 + 0.77q \quad (4.5)$$

## 候補ルート生成条件

候補ルートはごみ収集車の最大稼働時間と最大積載容量を満たすように生成する。

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_r} t_{k,k+1} + (|\mathcal{K}_r| - 2)t^W \leq T^M, \quad (r \in \mathcal{R}) \quad (4.6)$$

$$(|\mathcal{K}_r| - 2)q \leq Q^M, \quad (r \in \mathcal{R}) \quad (4.7)$$

ルート生成にはルーレット選択<sup>41)</sup>を用いる。移動時間が短いステーションを選びやすくするため、ステーション  $a$  の次にステーション  $b$  を巡る確率を以下の通り定義する。

$$p_{a,b}^R = \frac{\frac{1}{t_{a,b}}}{\sum_{i \in \mathcal{I}} \frac{1}{t_{a,b}}} \quad (4.8)$$

なお、あらかじめ全てのステーション間の移動時間を、OpenStreetMap を基に生成した道路ネットワーク上で、優先度付きキュー Dijkstra 法<sup>43)</sup>を用いて計算しておく。

## 候補ルート集合生成アルゴリズム

以下にルート生成アルゴリズムの全体手順を示す。対象地域内のステーションにおけるごみの積み込みなどの作業時間、1ステーションで収集するごみの量は所与とする。

- (1) 巡るステーションの数をランダムに決定する．現在の収集・運搬時間を 0，ごみの収集量を 0 とする．
- (2) ルーレット選択に基づき，未選択のステーションの中から次に巡るステーションを選択する．現在の収集・運搬時間を更新する．
- (3) 手順 (1) で決定したステーション数に達するか，候補ルート生成条件を満たさなくなるまで手順 (2) を繰り返す．
- (4) 条件を満たさない場合は最後に追加したステーションを削除し，収集・運搬時間を修正する．
- (5) 生成した候補ルート数があらかじめ設定した生成ルート数に達していない場合は手順 (1) に戻る．

生成した候補ルート集合を基に以下に示すモデルを用いてごみ収集車が巡るルートを選択する．

#### 記号

- ステーション  $i \in \mathcal{I}$

#### 定数

- 候補ルート  $r$  の総移動時間  $t_r^{\text{trip}}$   $(r \in \mathcal{R})$
- 候補ルート  $r$  の総移動距離  $d_r$   $(r \in \mathcal{R})$
- ごみ収集車台数  $Y$
- ごみ収集車一台当たりの週間維持管理費  $c^V$
- ごみ収集車一台当たりの作業員数  $m$
- 作業員 1 人当たりの時給  $c^W$
- 1 週間にごみ収集車を使用する日数  $n$
- ガソリン単価  $g$
- ステーション  $i$  のルート  $r$  への割り当て  $u_{i,r}$   $(i \in \mathcal{I}, r \in \mathcal{R})$

$$u_{i,r} = \begin{cases} 1 : \text{ルート } r \text{ がステーション } i \text{ を巡る} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

### 決定変数

- ルート  $r$  の採用  $x_r$  ( $r \in \mathcal{R}$ )

$$x_r = \begin{cases} 1 : \text{ルート } r \text{ を採用する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

### 目的関数

ごみの収集・運搬コストは1回の計画運用におけるコストとし、人件費、ごみ収集車のガソリン代および維持管理費の総和で定義する。

$$\text{Minimize} \quad \left( \sum_{r \in \mathcal{R}} t_r^{\text{trip}} x_r + t^W \right) c^W m + \sum_{r \in \mathcal{R}} d_r g x_r + \frac{c^V Y}{n} \quad (4.9)$$

各項にかかる係数は参考文献<sup>42, 44, 45)</sup>を基に以下の数値を用いた。維持管理費はごみ収集車の購入費用と保険料で計算した。

- ガソリン（軽油）単価：16.81 円/km
- 作業員1人あたりの人件費：3833.30 円/h
- 維持管理費：13982.85 円/台・週

### 制約条件

制約条件を示す。

- 全てのステーションを必ず1回以上巡るルートを採用する

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} u_{i,r} x_r \geq 1, \quad (i \in \mathcal{I}) \quad (4.10)$$

- ごみ収集車の台数

$$\sum_{r \in \mathcal{R}} x_r = Y \quad (4.11)$$

なお、得られた収集・運搬ルートに複数回巡るステーションが存在する場合、1回のみ巡るように修正する。この際、最も収集・運搬コストが小さくなるようにする。

### 4.3.3 収集・運搬ルートを考慮したステーション配置最適化

収集・運搬コストが小さいステーション配置を作成するためには、SA によって生成したステーション配置における収集・運搬ルートを作成する必要がある。この際、ステーション配置を変更するたびに収集・運搬ルートを作成すると計算時間が膨大となるため、前の配置で作成した収集・運搬ルートを利用する方法を検討する。

以下に全体の手順を示す。

- (1) 初期解となるステーション数が最小の配置とその配置における収集・運搬ルートを作成する。作成した収集・運搬ルートにかかるコストをこの配置の評価値とする。収集・運搬ルートを作成する過程で得た候補ルート集合  $\mathcal{R}^{(0)}$  を保持しておく。現在のステップ数を  $k = 1$  とする。
- (2) 近傍解を生成する。現在採用されている候補地（ステーション）の中からランダムに選択した一部を廃止し、全ての世帯の許容領域内に採用する候補地が存在するように新たに候補地を採用する。なお、本論文では廃止するステーションを 1 ヶ所とする。
- (3)  $\mathcal{R}^{(k-1)}$  に属する全ての候補ルートについて、廃止したステーションを除外した候補ルートに変更する。得られた候補ルート集合を  $\hat{\mathcal{R}}$  とする。
- (4)  $\hat{\mathcal{R}}$  のランダムに選ばれた一部に対して、新たに採用する候補地を巡るように候補ルートを変更し、得られた候補ルート集合を  $\mathcal{R}^{(k)}$  とする。
- (5) 手順 (2) で作成したステーション配置の評価値を導出するため、数理計画法を用いて  $\mathcal{R}^{(k)}$  から最適な収集・運搬ルートを選択し、収集・運搬コストを計算する。
- (6) 変更したステーション配置について手順 (5) で計算した収集・運搬コストが、ステーション配置を変更する前の収集・運搬コストより小さくなる場合は採用し、大きくなる場合は確率的に採用する。この時の確率  $p$  は温度  $T^{\text{temp}}$ 、暫定解の収集・運搬コスト  $e$ 、手順 (5) で算出した収集・運搬コスト  $e'$  を用いて式 (4.12) で定義する。

$$p = \exp\left(\frac{e - e'}{T^{\text{temp}}}\right) \quad (4.12)$$

変更したステーション配置が採用されなかった場合は  $\mathcal{R}^{(k-1)}$  を  $\mathcal{R}^{(k)}$  として次のステップへ引き継ぐ。

- (7) 現在のステップ数  $k$  が設定した繰り返し数に達していれば終了する。そうでない場合、ステップ数を  $k + 1$  に更新し、手順 (2) へ戻る。この時、温度  $T^{\text{temp}}$  に冷却率  $r (\leq 1)$  を掛けて温度を更新する。

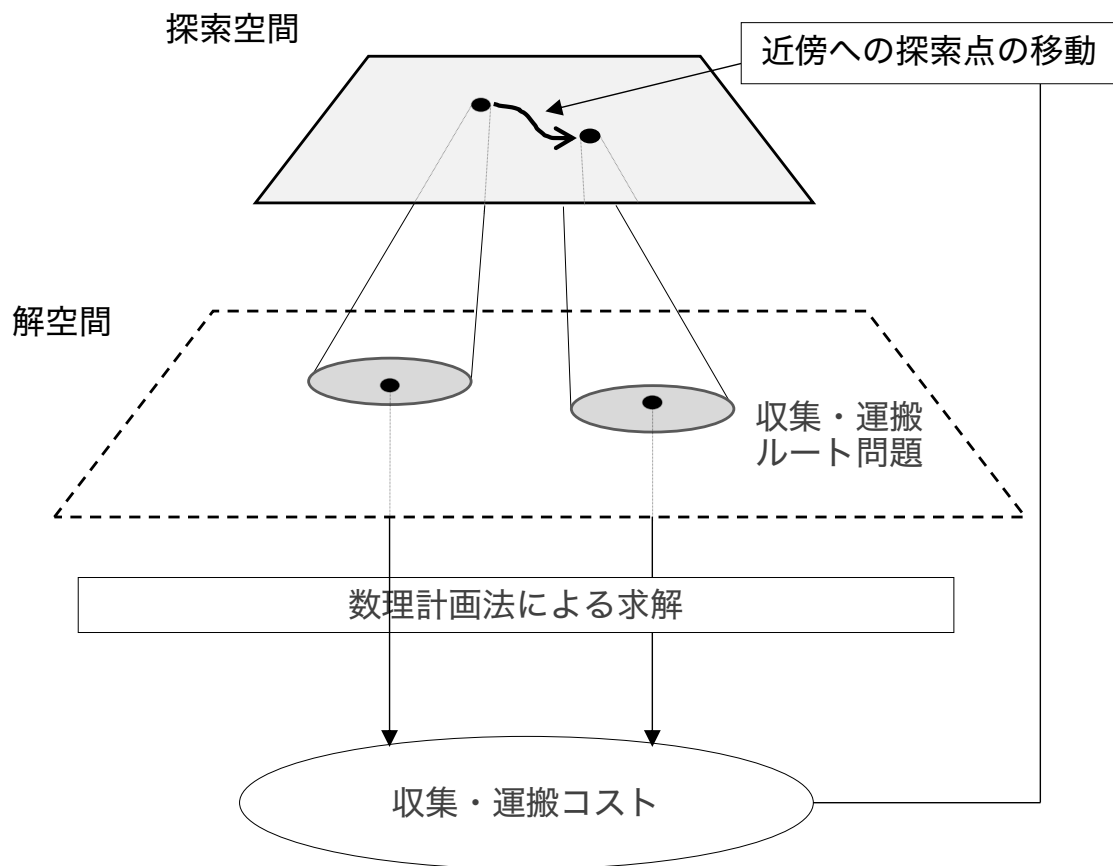


図 4.7: ステーション配置の探索プロセス

解空間におけるステーション配置の探索プロセスを図 4.7 に示す。まず、ステーション配置の探索を行い、ステーション配置を決定する。得られたステーション配置の下で収集・運搬ルートの探索を行う。収集・運搬ルートは数理計画によって導出する。得られた収集・運搬コストを基に暫定解を更新し、その後、再びステーション配置の探索を行う。これにより、収集・運搬コストが小さいステーション配置を導出することができる。

収集・運搬ルートの作成方法を図 4.8 に示す。変更したステーション配置における候補ルートを生成する際、手順 (3), (4) を用いることで、先行研究<sup>29)</sup>と比較して計算時間を短縮できる。また、全ての候補ルートに新たなステーションを追加するのではなく、一部に限定することで新たなステーションを重複して巡る可能性を減らし、収集・運搬コストの無駄な増加を防ぐ。加えて、単に新たに採用した候補地を変更前の最適収集・運搬ルートのどこに挿入するかではなく、候補ルートに対して新たな候補地を挿入し改めてルートの選択を最適化するため配置の変更によって最適なルートが変わった場合にも対応できる。収集・運搬ルートにかかるコストを修正する際には、4.3.2 節に示す OpenStreetMap を利用した現実的なコストを反映

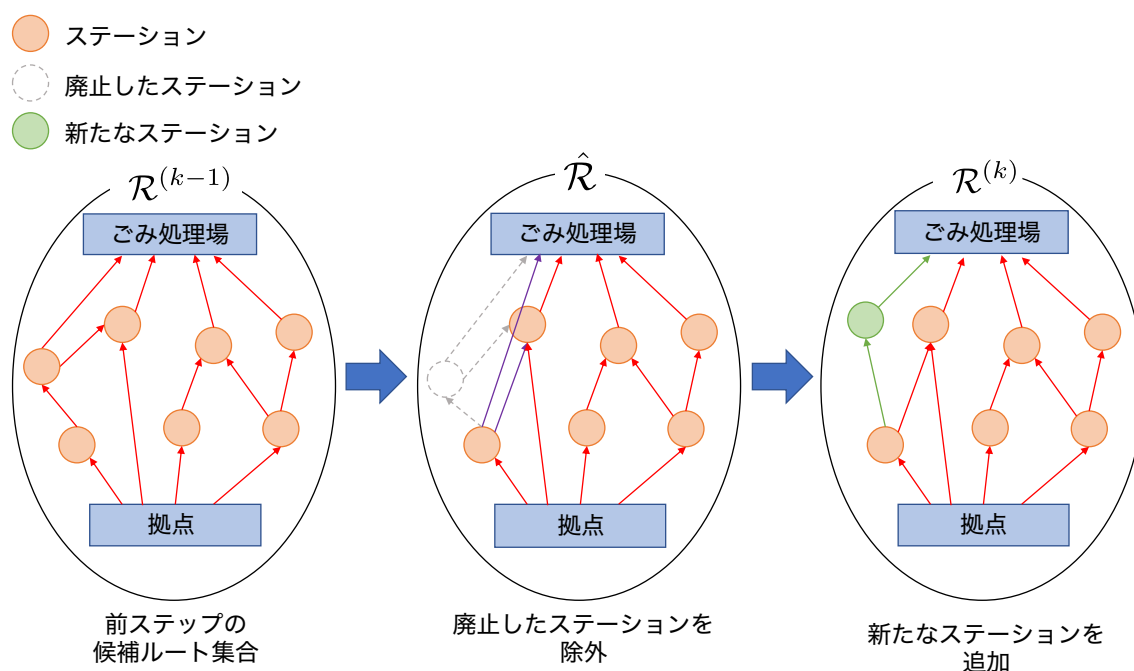


図 4.8: 収集・運搬ルートの生成

する。

新たに採用する候補地の選択基準として、廃止する候補地と近い場所に設定されている候補地の中から選択する方法を採用する。図 4.9 は対象地域において廃止する候補地の周辺を示している。採用されている中央の候補地を廃止して新たな候補地を採用する際、廃止する候補地に隣接する候補地の中から選択する。

## 4.4 検証

### 4.4.1 妥当性の確認

提案手法の妥当性を検証するため富山県南砺市井口地区(可燃ごみ、ステーション9ヶ所)の実際のステーション配置に基づき、4.3.2節に示した手法で収集・運搬ルートのみを作成した。実際に南砺市がごみ収集業者との契約で支払っている契約金と、提案手法によって導出したコストを比較したところ、提案手法によって導出したコストは実際の運用コスト(2018年時)の約90%の金額であった。井口地区はステーションが少ないため実際の収集・運搬ルートが最適に近いと仮定し、加えて業者が得る利益を考慮すると、本手法によっておおよそ妥当な結果が得られており、人件費などのパラメータが適切であることが確認できた。

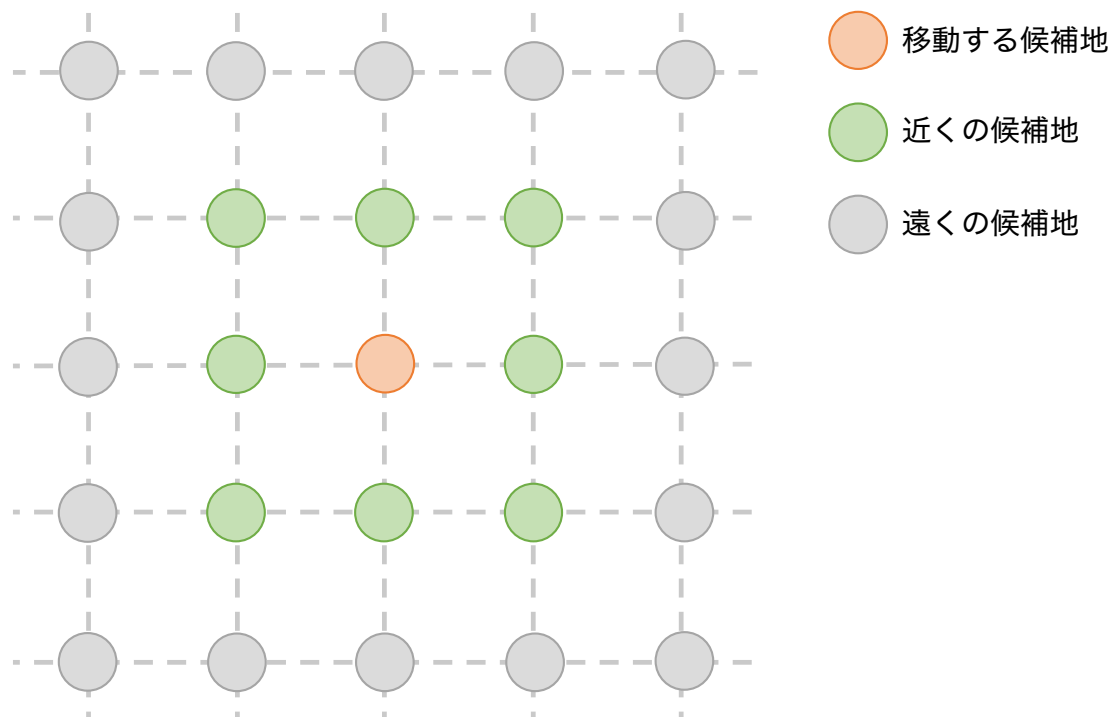


図 4.9: ステーション配置の近傍定義

表 4.1: 対象地区

地区名	ごみ種別	実際の ステーション数	初期配置の ステーション数	ごみ総量 [kg]	世帯数
城端	可燃ごみ	123	90	10,365.6	3,700
福野	可燃ごみ	192	146	16,749.6	7,011

#### 4.4.2 シミュレーション設定

富山県南砺市内の表4.1に示す地域を対象とし、ステーション配置と収集・運搬ルートの同時最適化手法によってごみ収集・運搬コストが削減可能であることを示す。なお、対象地域内の世帯情報はゼンリンのZmap-TOWN II<sup>46)</sup>を用いて取得した。

SA等のパラメータは対象地区の規模などに合わせて適切に設定することが望ましく、本検証では以下のとおり設定した。

- 候補ルート数：50,000
- 初期温度  $T$ ：10,000
- 冷却率  $r$ ：0.95
- 総ステップ数：100

また、ステーションの初期配置および候補ルート集合から巡るルートを選択する部分に CPLEX<sup>25)</sup> を使用した。

### 4.4.3 結果

まず、実際のステーション配置に対して収集・運搬ルートを生成し、収集・運搬コストを算出した。この時の収集・運搬コストは城端地区では1回あたりおよそ13万円、福野地区では25万円であった。

ステーションの再配置を行いステーション数が最小となる配置を初期解として、SAによるステーション配置と収集・運搬ルートの同時最適化を行う。提案手法中の近傍解の生成においてランダム性があるため、乱数を変えてそれぞれ5回検証した。以下では5試行をそれぞれケース1, ..., ケース5と呼ぶものとする。

城端地区を対象とした検証の結果として図4.10に収集・運搬コストの推移、表4.2に最適化による世帯とステーション間の増加距離(直線距離)をそれぞれ乱数ごとに示す。参考文献<sup>28)</sup>の手法を用いて作成したSAにおける初期配置ではステーションが90ヶ所となった。この時の収集・運搬コストは1回の収集・運搬あたりおよそ9万円であり、実際の配置と比較するとおよそ4万円のコスト削減が見込まれる。SAによるステーション配置最適化によっておよそ5千円のコストが削減され、実際の配置と比較すると、最終的に年額ではおよそ900万円のコスト削減が見込まれる。ステーション配置の変更による世帯とステーション間の距離の変動は±100m程度であることがわかった。一方でステーション配置最適化の際に多くの世帯はステーションとの距離が変わらなかったため、平均ではほぼ変化しないことがわかった。

福野地区を対象とした検証の結果として図4.11に収集・運搬コストの推移、表4.3に最適化による世帯とステーション間の増加距離(直線距離)をそれぞれ乱数ごとに示す。初期配置ではステーションが146ヶ所となった。この時の収集・運搬コストは1回の収集・運搬あたりおよそ21万円であり、実際の配置と比較するとおよそ4万円のコスト削減が見込まれる。SAによるステーション配置最適化によっておよそ2万円のコストが削減され、実際の配置と比較すると、最終的に年額ではおよそ1,800万円のコスト削減が可能であることがわかった。ステーション配置の変更による世帯とステーション間の距離の変動は±90m程度であることがわかった。一方で城端地区と同様に多くの世帯はステーションとの距離が変わらなかったため、平均ではほぼ変化しないことがわかった。

いずれの地区においても世帯とステーションとの増加距離は図4.2、図4.3に示した住民アンケートの最大値110m以下であり、住民の利便性が制約として正しく反映されていることがわかる。

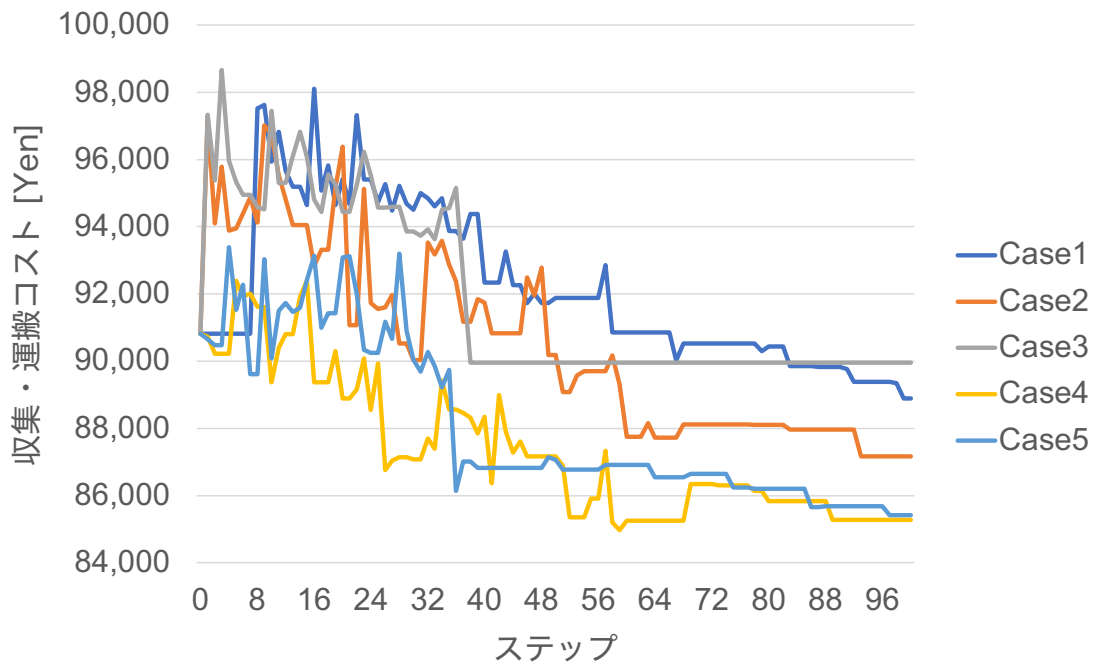


図 4.10: SA における収集・運搬コストの遷移 (城端地区)

4.3.3 節で説明した計算時間の短縮手法によってどの程度効果があったかを検証するため、福野地区を対象として先行研究<sup>29)</sup>に示す手法と本論文に示す手法でそれぞれ 10 回ずつ計算時間を計測した。

先行研究<sup>29)</sup>に示す手法を用いる場合、候補ルート集合の生成に 1 回あたり約 33 分かかった。一方で、本論文に示す手法によって候補ルート集合を修正する場合、1 回あたり約 40 秒であった。本検証では総ステップ数を 100 としたため、ステップごとに毎回候補ルート集合を生成する場合と比較して全体で 50 時間程度短縮できた。

表 4.2: ステーション配置最適化によるステーションまでの距離の変化量 (城端地区)

Case	最小値 [m]	平均値 [m]	最大値 [m]
1	-89.46	-1.09	71.23
2	-89.53	-1.27	104.54
3	-91.28	-0.96	71.19
4	-71.27	-0.17	71.27
5	-103.52	-0.27	69.82

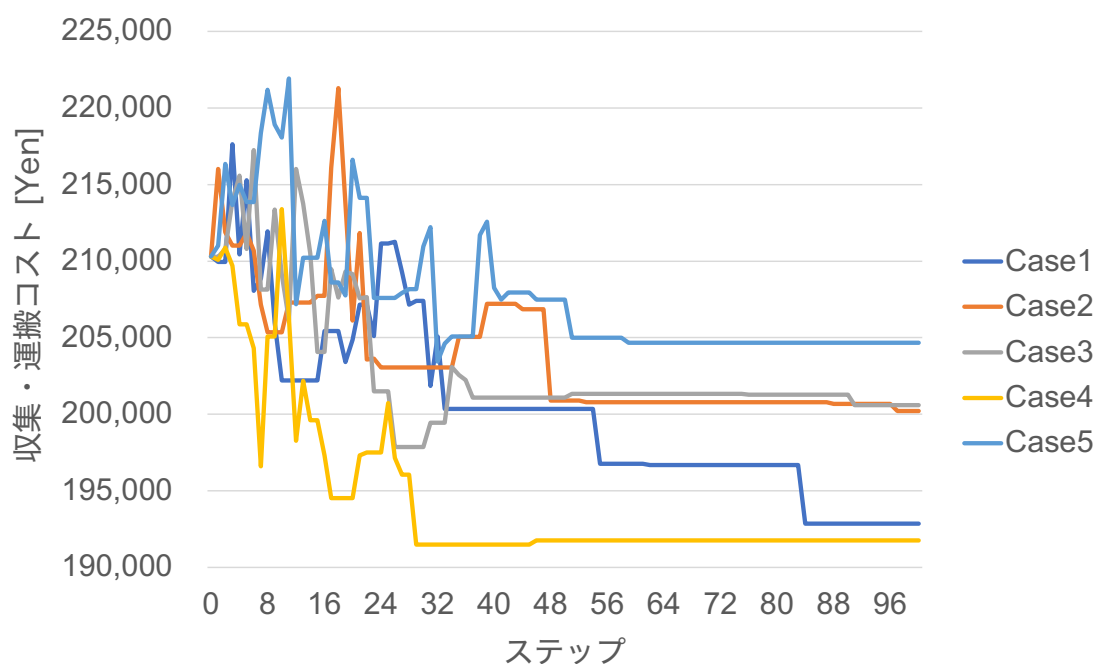


図 4.11: SA における収集・運搬コストの遷移 (福野地区)

## 4.5 おわりに

本章では家庭ごみの収集サービスに焦点を当て、住民の利便性と車両収集の効率性を同時に満足することを目的とし、ごみステーション配置と収集・運搬ルートの同時最適化手法を提案した。ごみステーション配置問題に対しては、最適化モデルとして集合被覆モデル用い、その際、各家庭の位置を被覆要素に、およびそれらの家庭に割り当てられたごみステーションの位置を被覆に対応させた。さらに、アンケート調査から得られた住民利便性を制約条件として設定し、この条件を満たすステーション配置のみを被覆として与えるものとした。収集・運搬ルート問題に対しては

表 4.3: ステーション配置最適化によるステーションまでの距離の増加量 (福野地区)

Case	最小値 [m]	平均値 [m]	最大値 [m]
1	-89.48	0.25	70.52
2	-70.94	-1.75	69.51
3	-71.28	-0.84	71.03
4	-85.73	-0.52	89.33
5	-85.17	-0.92	71.30

集合被覆モデルを用い、ステーションを被覆要素、ルートを被覆に対応させた。この際、最大収集時間を制約として組み込むことによって短時間で良質な解の導出を実現した。OpenStreetMap を基に現実の道路上における移動時間を反映した。SA による収集・運搬ルートを考慮したステーション配置最適化においては、前のステップで生成した候補ルート集合を活用することによって、変更したステーション配置に対する候補ルート集合の生成時間を短縮した。富山県南砺市を対象とした計算機実験により、収集・運搬コストの削減が可能であることを定量的に示した。以上の検討によって既存の社会システムに対しても数理計画モデルを用いたシミュレーション・評価が可能であることを示した。またメタヒューリスティクスと組み合わせることで、より大規模な問題に対しても適用可能であることも示した。

本研究で扱った問題では、ルートの生成方法に対してメタヒューリスティクスを採用した。一方で、集合被覆モデルを前提とすると列生成法や分枝カット価格法などの適用も考えられる。この点についての比較・検討については今後の課題としたい。

また提案手法の課題として、近傍解の生成方法が挙げられる。現在は全ステーションのうち1ヶ所をそのステーションと隣接する格子点上に移動する方法を採用しているが、複数のステーションを移動することや、移動先の格子点を増やすなどの改善案が考えられる。

## 第 5 章

# 大規模・多制約スケジューリング問題に対する ハイブリッド手法

本章では大規模かつ複雑な問題に対応するため、機械加工スケジューリング問題を取り上げ、汎用性のあるハイブリッド手法を提案する。

### 5.1 はじめに

近年、製造現場における生産工程の自動化が急速に進んでいる。しかし、依然として手作業が必要な作業もある。そのため人と機械が混在することで生産管理の煩雑さなど、運用上の問題が発生することがある。これらの問題は組合せ最適化問題として解くことができるが、実際の現場では考慮すべき要件が多く決定変数や制約条件が増加する傾向にある。このような最適化問題を解く際には、メタヒューリスティクス<sup>47)</sup>が用いられることが多い。しかし、規模が大きい問題や制約条件が多く複雑な問題では、解の表現と近傍の定義が難しく、仮に定義できたとしても探索空間が大規模であったり複雑であったりする。そのためこのような問題においては、計算にかなりの時間を費やしても良い解を導くことは困難である<sup>48)</sup>。このような問題に対しては、制約構造や変数表現に応じて効果的に近傍設定を行う必要がある。本研究では、MIP モデルに基づく大近傍局所探索法の近傍構造を工夫することで、制約条件の多い大規模問題に対して現実的な計算時間内で良好な解を導出することを試みる。近年では、このような MIP モデルを局所探索手法に組み込んだ手法が提案されている<sup>49, 50)</sup>。

本研究では、実際の自動化製造現場における加工スケジューリング問題を対象とする。先行研究では、この問題に対して MIP モデルに基づく最適化手法を提案した。しかし、その最適化にはかなりの計算時間を要するという問題があった。なぜなら、実際の製造現場では、対象物(以下、ワークと呼ぶ)の加工や作業には多くの制約条件が存在するからである。場合によっては、ワークや作業が多い長期的なス

スケジュールを必要とすることもある。

現実的な計算時間内で良好な解を導くことを目的とした新提案の最適化手法では、MIP 近傍局所探索法にフィルタという新たな概念を組み込むことで、効率的に良好な解を得る。そして提案手法の妥当性を検証するために、実際の処理要求に基づく問題に対して計算機実験を行った。また、フィルタを用いた場合の効果についても検証した。

## 5.2 対象とする機械加工スケジューリング問題

### 5.2.1 対象工程

本研究では、実在する従業員数約 1,000 人程度の自動車製造設備の工作機械メーカーを対象とする。この工場は、工程全体がコンピュータで管理されており、加工機械も 24 時間稼働している。しかし、スケジューリングは各工程の担当者が各日の朝に手作業で行なっており、結果として各ワークの完成までのリードタイムを把握できない状況にある。本研究ではとくに、このような工場におけるボトルネック工程であるマシニングセンタを用いた金属部品加工工程に着目し、この工程の生産効率の向上を試みる。

マシニングセンタ (MC: Machning Center) とは、異種の加工を 1 台で行うことができる工作機械であり、主に金型の製造や金属部品の加工等に用いられる。加工は以下の (a)~(c) の手順に従う。このとき作業者と MC の間には自動パレット・システムと呼ばれる設備が介在するものとする (図 5.1)。

- (a) ワークと治具を取り付ける
- (b) ワークを加工する
- (c) ワークを取り外す

パレットとはワークを取り付ける台であり、このパレットが複数用意されることにより、作業者は任意の順番でワークをパレットに取り付けることができる。一方 MC では、ワークが取り付け済みのパレットの中から (作業者が取り付けた順番とは無関係に) ワークを順次処理していく。加工済みのワークは自動パレットシステムに戻され、作業者は戻されたワーク群の中から順次ワークをパレットから取り外す。

パレットにはワークを加工するための治具が合わせて取り付けられている必要がある。治具の種類はワークに応じてあらかじめ決まっており、必要に応じてパレットから着脱される。

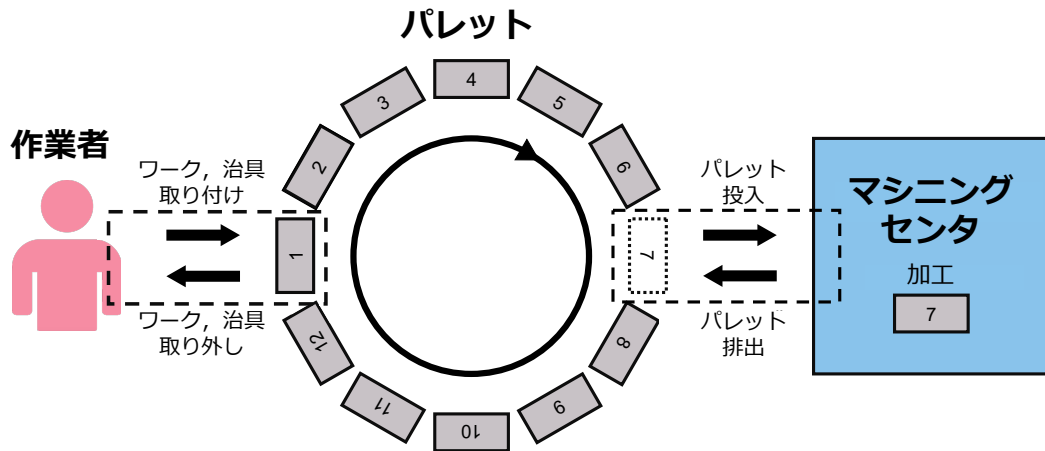


図 5.1: 自動パレットシステム

ワークによっては、一度加工を終えた後に再度加工することが必要となる。そのようなワークは、加工を終えた後にパレットから取り外した後に、必要加工回数を満たしていなければ、再びパレットに取り付けられ、加工される。これをワークの必要加工回数を満たすまで繰り返す。

上記のような処理を行うにあたり、MC は休み無く稼働できる一方で、作業者は定期的に休憩をとる必要があり、とくに夜間に作業ができない。本研究では複数日に渡るスケジュールの導出を前提とするため、夜間に MC のみが稼働するような状況に如何に対応するかが肝要となる。

スケジュールの評価については種々のものが考えられるが、本稿では最大完了時間（メイクスパン）と、各ワークの納期余裕の最大化を取り上げる。

### 5.2.2 混合整数計画モデル

5.2.1 節で示した工程におけるスケジューリングを行うにあたっては、

- 作業者と MC の作業順序を独立して決定できる、
- 作業者の作業可能時間に制約がある

といった特徴を有する。このような問題は、作業員と MC の 2 機械のジョブショップ・スケジューリング問題 (Job-shop Scheduling Problem: JSP<sup>51)</sup>) として捉えられる<sup>52)</sup>。このとき仕事はワークに対応し、作業は

- ワークおよび治具の取り付け (作業者)

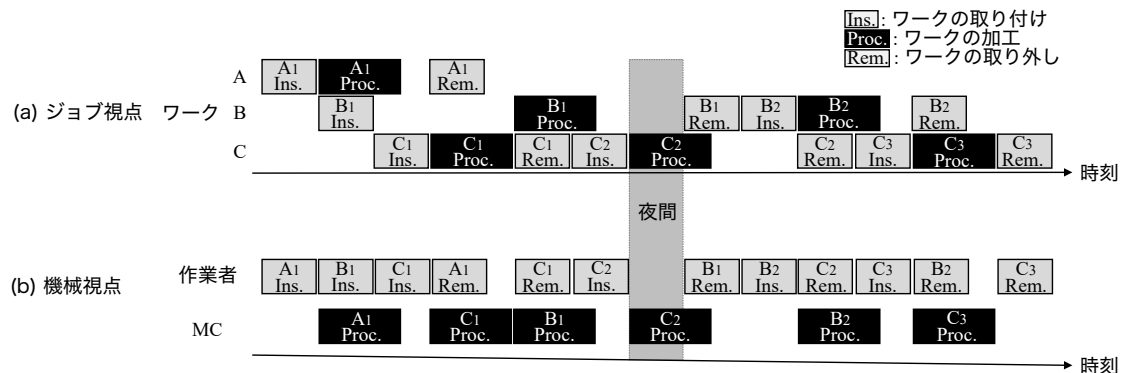


図 5.2: スケジュール例

- ワークおよび治具の取り外し (作業員)
- ワークの加工 (MC)

の3種類の処理に対応する (括弧は処理する主体を表す).

スケジューリング問題の一例を以下に示す.

- ワーク A, B, C:
  - A: 1 回の処理を経て完成 (作業  $A_1$ )
  - B: 2 回の処理を経て完成 (作業  $B_1, B_2$ )
  - C: 3 回の処理を経て完成 (作業  $C_1, C_2, C_3$ )

この例題に対するスケジュール例を図 5.2 に示す. このスケジュールではまず作業員がワーク  $A_1$  を取り付ける. 次に作業員はワーク  $B_1$  を別のパレットに取り付け, MC は同時にワーク  $A_1$  の加工を開始する.

以上で示されるジョブショップ・スケジューリングに加えて, パレットおよび治具の選択に関する決定および制約がある. 具体的には

- パレット:
  - (a) パレットには同時に複数のワークを取り付けることはできない
  - (b) 利用可能なパレット数には上限がある
- 治具:
  - (A) ワーク毎に必要な治具の種類が定められている
  - (B) 治具の取り付け/取り外しは作業員によって行われ, 一定の時間を要する. 治具はパレットに取り付けられたままでもよく, 必要に応じて取り付け/取り外しが行われる.
  - (C) 利用可能な治具数にはその種類毎に上限がある

このような問題に対して、以下の混合整数計画モデルが示されている<sup>52)</sup>。

### 記号

- 機械番号  $M_i$ 

$$\begin{cases} i = 1 : \text{作業者} \\ i = 2 : \text{MC} \end{cases}$$
- ワーク  $J_j$   $(j \in \{1, \dots, W\})$
- $J_j$  の作業数  $n_j$   $(j \in \{1, \dots, W\})$
- 作業集合  $\mathcal{W}(= \{N_{j-1} + 1, \dots, N_j \mid N_j = \sum_{m=1}^j N_m, N_0 = 0\})$
- 取り付け作業集合  $\mathcal{B}$
- 作業者の休憩集合  $\mathcal{R}$
- 作業の通し番号  $O_k$   $(k \in \mathcal{W} \cup \mathcal{R})$
- 治具番号  $H_h$   $(h \in \{1, \dots, F\})$
- $O_k$  に使用可能な治具集合  $\mathcal{G}_k$   $(k \in \mathcal{W})$
- $O_k$  を処理可能な機械番号  $\mu_k$   $(k \in \mathcal{W})$
- パレット番号  $L_l$   $(l \in \{1, \dots, 12\})$

### 定数

- ワーク数  $W$
- 治具総数  $F$
- $O_k$  の処理時間  $P_k$   $(k \in \mathcal{W} \cup \mathcal{R})$
- 夜間  $T$
- 日  $s$   $(s \in \{1, \dots, D\})$
- $s$  日目の夜間開始時刻  $t_s^{\text{NS}}$   $(s \in \{1, \dots, D\})$
- 作業者の休憩開始時刻  $t_k^{\text{RS}}$   $(k \in \mathcal{R})$
- $O_k$  と  $O_{k'}$  の品番の非共通を示す  $\omega_{kk'}$   $(k, k' \in \mathcal{B})$

$$\omega_{kk'} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ と } O_{k'} \text{ の品番が異なる} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- $J_j$  の納期  $E_j$   $(j \in \{1, \dots, W\})$
- 十分大きな実数  $A$

## 決定変数

- $O_k$  の作業開始時刻  $t_k^S$  ( $k \in \mathcal{W} \cup \mathcal{R}$ )
- 作業の処理順序  $x_{kk'}$  ( $k, k' \in \mathcal{W} \cup \mathcal{R}$ )

$$x_{kk'} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ の後に } O_{k'} \text{ を処理する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 作業の日付割り当て  $y_k^s$  ( $s \in \{1, \dots, D\}, k \in \mathcal{W}$ )

$$y_k^s = \begin{cases} 1 : O_k \text{ を } s \text{ 日目の昼に処理する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 作業のパレット割り当て  $v_{kl}$  ( $k \in \mathcal{W}, l \in \{1, \dots, 12\}$ )

$$v_{kl} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ をパレット } l \text{ で処理する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 作業の治具割り当て  $u_{kh}$  ( $k \in \mathcal{W}, h \in \{1, \dots, F\}$ )

$$u_{kh} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ を治具 } h \text{ で処理する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

## 従属変数

- $O_k$  の完了時刻  $t_k^F$  ( $k \in \mathcal{W} \cup \mathcal{R}$ )
- $J_j$  の納期余裕  $\psi_j$  ( $j \in \{1, \dots, W\}$ )
- パレット  $l$  について、作業間のパレット共有の有無  $\rho_{kk'l}$  ( $k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, l \in \{1, \dots, 12\}$ )

$$\rho_{kk'l} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ と } O_{k'} \text{ がパレット } l \text{ を共有する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 作業間のパレット共有の有無  $\Delta_{kk'}, \Delta_{kk'}^R$  ( $k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}$ )

$$\Delta_{kk'} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ と } O_{k'} \text{ がパレットを共有する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta_{kk'}^R = \begin{cases} 1 : O_k \text{ と } O_{k'} \text{ がパレットを共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 治具  $h$  について, 作業間の治具共有の有無  $\varepsilon_{kk'h}$  ( $(k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, h \in \{1, \dots, F\})$ )

$$\varepsilon_{kk'h} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ と } O_{k'} \text{ が治具 } h \text{ を使用する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 作業間の治具共有の有無  $\alpha_{kk'}, \alpha_{kk'}^R$  ( $(k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\})$ )

$$\alpha_{kk'} = \begin{cases} 1 : O_k \text{ と } O_{k'} \text{ が治具を共有する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha_{kk'}^R = \begin{cases} 1 : O_k \text{ と } O_{k'} \text{ が治具を共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- パレットにおける作業の直近の処理順序  $x_{kk'}^P$  ( $(k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\})$ )

$$x_{kk'}^P = \begin{cases} 1 : \text{同一パレット上で } O_k \rightarrow O_{k'} \text{ の順で処理する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 治具における作業の処理順序  $x_{kk'}^J$  ( $(k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\})$ )

$$x_{kk'}^J = \begin{cases} 1 : \text{同一治具上で } O_k \rightarrow O_{k'} \text{ の順で処理する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 治具における作業間のパレット共有の有無  $\kappa_{kk'}$  ( $(k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\})$ )

$$\kappa_{kk'} = \begin{cases} 1 : \text{同一治具上で } O_k \rightarrow O_{k'} \text{ の順で実行し, パレットを共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- パレットにおける作業間の治具共有の有無  $\lambda_{kk'}$  ( $(k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\})$ )

$$\lambda_{kk'} = \begin{cases} 1 : \text{同一パレット上で } O_k \rightarrow O_{k'} \text{ の順で実行し, 治具を共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- パレットにおける治具共有の有無  $\gamma_k^B, \gamma_k^A$  ( $(k \in \mathcal{B})$ )

$$\gamma_k^B = \begin{cases} 1 : \text{同一パレット上で } O_k \text{ の直前に行われる作業と治具を共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\gamma_k^A = \begin{cases} 1 : \text{同一パレット上で } O_k \text{ の直後に行われる作業と治具を共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 治具におけるパレット共有の有無  $\pi_k^B, \pi_k^A$  ( $k \in \mathcal{B}$ )

$$\pi_k^B = \begin{cases} 1 : \text{同一治具上で } O_k \text{ の直前に行われる作業とパレットを共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\pi_k^A = \begin{cases} 1 : \text{同一治具上で } O_k \text{ の直後に行われる作業とパレットを共有しない} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 治具の使用の有無  $\tau_h$  ( $h \in \{1, \dots, F\}$ )

$$\tau_h = \begin{cases} 1 : \text{治具 } h \text{ を 1 回以上使用する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 治具交換の有無  $\phi_k^B, \phi_k^A$  ( $k \in \mathcal{B}$ )

$$\phi_k^B = \begin{cases} 1 : O_k \text{ を処理する際に治具を取り付ける} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\phi_k^A = \begin{cases} 1 : O_{k+2} \text{ を処理する際に治具を取り外す} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 作業間の段取り替えの有無  $\eta_{kk'}$  ( $k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}$ )

$$\eta_{kk'} = \begin{cases} 1 : O_k, O_{k'} \text{ 間で段取り替え作業が発生する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

- 段取り替えの有無  $\theta_k$  ( $k \in \mathcal{B}$ )

$$\theta_k = \begin{cases} 1 : O_k \text{ を処理する際に段取り替え作業が発生する} \\ 0 : \text{otherwise} \end{cases}$$

## 目的関数

納期余裕の最大化

$$\text{Maximize} \quad \sum_{j=1}^W \psi_j \tag{5.1}$$

## 制約条件

全ての変数是非負制約を持つ.

$$E_j - t_k^F \geq \psi_j, \quad (j \in \{1, \dots, W\}, k = \sum_{m=1}^j N_m) \quad (5.2)$$

$$t_k^S \geq C_j, \quad (k \in \mathcal{B}, j \in \{1, \dots, W\}) \quad (5.3)$$

$$t_k^F \leq E_j, \quad (k = \sum_{m=1}^j N_m, j \in \{1, \dots, W\}) \quad (5.4)$$

$$t_k^S \geq t_{k-1}^F, \quad (k \in \{N_{j-1} + 2, \dots, N_j \mid j \in \{1, \dots, W\}\}) \quad (5.5)$$

$$t_{k'}^S \geq t_k^F - A(1 - x_{kk'}), \quad (k, k' \in \{\mathcal{W} \cup \mathcal{R} \mid k \neq k', \mu_k = \mu_{k'}\}) \quad (5.6)$$

$$t_k^S \geq t_{k'}^F - Ax_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{W} \cup \mathcal{R} \mid k \neq k', \mu_k = \mu_{k'}\}) \quad (5.7)$$

$$\sum_{s=1}^D y_k^s = 1, \quad (k \in \{\mathcal{W} \mid \mu_k = 1\}) \quad (5.8)$$

$$t_k^S = t_k^{\text{RS}}, \quad (k \in \mathcal{R}) \quad (5.9)$$

$$t_k^F \geq t_k^S + P_k, \quad (k \in \mathcal{W} \cup \mathcal{R}) \quad (5.10)$$

$$t_k^S \geq (t_{s-1}^{\text{NS}} + T)y_k^s, \quad (k \in \{\mathcal{W} \mid \mu_k = 1\}, s \in \{2, \dots, D\}) \quad (5.11)$$

$$t_s^{\text{NS}} + A(1 - y_k^s) \geq t_k^F, \quad (k \in \{\mathcal{W} \mid \mu_k = 1\}, s \in \{1, \dots, D\}) \quad (5.12)$$

$$\sum_{l=1}^{12} v_{kl} = 1, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.13)$$

$$t_{k'}^S \geq t_{k+2}^F + A(v_{kl} + v_{k'l} + x_{kk'} - 3), \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, l \in \{1, \dots, 12\}) \quad (5.14)$$

$$\sum_{h \in \mathcal{G}_k} u_{kh} = 1, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.15)$$

$$u_{kh} = 0, \quad (k \in \mathcal{B}, h \in \{1, \dots, F \mid \overline{\mathcal{G}_k}\}) \quad (5.16)$$

$$t_{k'}^S \geq t_{k+2}^F + A(u_{kh} + u_{k'h} + x_{kk'} - 3), \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, h \in \mathcal{G}_k) \quad (5.17)$$

$$t_k^F \geq t_k^S + P_k + 22.5\phi_k^{\text{B}}, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.18)$$

$$t_{k+2}^F \geq t_{k+2}^S + P_{k+2} + 22.5\phi_k^{\text{A}}, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.19)$$

$$t_k^F \geq t_k^S + P_k + 10\theta_k, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.20)$$

$$\rho_{kk'l} \geq v_{kl} + v_{k'l} - 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, l \in \{1, \dots, 12\}) \quad (5.21)$$

$$\rho_{kk'l} \leq \frac{v_{kl} + v_{k'l}}{2}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, l \in \{1, \dots, 12\}) \quad (5.22)$$

$$\Delta_{kk'} \geq v_{kl} + v_{k'l} - 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, l \in \{1, \dots, 12\}) \quad (5.23)$$

$$\Delta_{kk'} = \sum_l^{12} \rho_{kk'l}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.24)$$

$$\Delta_{kk'}^R = 1 - \Delta_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.25)$$

$$\varepsilon_{kk'h} \geq u_{kh} + u_{k'h} - 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, h \in \mathcal{G}_k) \quad (5.26)$$

$$\varepsilon_{kk'h} \leq \frac{u_{kh} + u_{k'h}}{2}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}, h \in \mathcal{G}_k) \quad (5.27)$$

$$x_{k+2 \ k'} \geq x_{kk'} + \alpha_{kk'} - 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.28)$$

$$\alpha_{kk'} = \sum_{h \in \mathcal{G}_k} \varepsilon_{kk'h}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.29)$$

$$\alpha_{kk'}^R = 1 - \alpha_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.30)$$

$$x_{kk'}^P \leq \Delta_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.31)$$

$$x_{kk'}^P \leq x_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.32)$$

$$t_{k'}^S \geq t_{k+2}^F - A(1 - x_{kk'}^P), \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.33)$$

$$x_{kk'}^P + x_{k'k}^P \leq 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.34)$$

$$\sum_{k' \in \mathcal{B}} x_{kk'}^P \leq 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.35)$$

$$\sum_{k \in \{0, \mathcal{B}\}} x_{kk'}^P = 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.36)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{B}} x_{0k}^P \leq 12 \quad (5.37)$$

$$x_{kk'}^J \leq \alpha_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.38)$$

$$x_{kk'}^J + x_{k'k}^J \leq 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.39)$$

$$x_{kk'}^J \leq x_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.40)$$

$$\sum_{k' \in \mathcal{B}} x_{kk'}^J \leq 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.41)$$

$$\sum_{k \in \{0, \mathcal{B}\}} x_{kk'}^J = 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.42)$$

$$\lambda_{kk'} \geq x_{kk'}^P + \alpha_{kk'}^R - 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.43)$$

$$\lambda_{kk'} \leq \frac{x_{kk'}^P + \alpha_{kk'}^R}{2}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.44)$$

$$\kappa_{kk'} \geq x_{kk'}^J + \alpha_{kk'} - 1, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.45)$$

$$\kappa_{kk'} \leq \frac{x_{kk'}^J + \alpha_{kk'}}{2}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.46)$$

$$\gamma_k^B \geq \sum_{k' \in \mathcal{B}} \lambda_{k'k}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.47)$$

$$\gamma_k^A \geq \sum_{k' \in \mathcal{B}} \lambda_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.48)$$

$$\pi_k^B \geq \sum_{k' \in \mathcal{B}} \kappa_{k'k}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.49)$$

$$\pi_k^A \geq \sum_{k' \in \mathcal{B}} \kappa_{kk'}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.50)$$

$$\tau_h \geq \frac{\sum_{k \in \mathcal{B}} u_{kh}}{A}, \quad (h \in \mathcal{G}_k) \quad (5.51)$$

$$\tau_h \leq \sum_{k \in \mathcal{B}} u_{kh}, \quad (h \in \mathcal{G}_k) \quad (5.52)$$

$$\phi_k^B \geq \frac{\pi_k^B + \gamma_k^B}{2}, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.53)$$

$$\phi_k^A \geq \frac{\pi_k^A + \gamma_k^A}{2}, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.54)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{B}} x_{0k}^J = \sum_{h \in \{1, \dots, F\}} \tau_h, \quad (k \in \mathcal{B}) \quad (5.55)$$

$$\eta_{kk'} \geq \omega_{kk'} + x_{kk'}^P + \alpha_{kk'} - 2, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.56)$$

$$\eta_{kk'} \leq \frac{\omega_{kk'} + x_{kk'}^P + \alpha_{kk'}}{3}, \quad (k, k' \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.57)$$

$$\theta_k = \sum_{k' \in \mathcal{B}} \eta_{kk'}, \quad (k \in \{\mathcal{B} \mid k \neq k'\}) \quad (5.58)$$

## 5.3 MIP 近傍局所探索法に基づく解法

### 5.3.1 概要

対象問題に対して、局所探索に基づくメタヒューリスティクスを適用する。局所探索とは任意の実行可能解から開始し、解の一部を変更することを繰り返し解を改善する近似アルゴリズムである<sup>47)</sup>。

対象問題に MIP 近傍局所探索法を適用することにより、現実的な計算時間内で良好なスケジュールの導出を目指す。本手法は数理計画法を用いて近傍解を生成するものである。そのため通常の局所探索法よりも近傍を広く定義しながら効率的に探索を行い、その近傍内における最適解を導くことができる。このような方法は局所探索で包含される近傍領域が広いことから、大近傍探索とも呼ばれる<sup>53)</sup>。

本研究では任意の実現可能な解を初期解として局所探索法を適用する。局所探索法の各反復において、数理計画法を用いて近傍解を導出する。この際、MIP モデルの決定変数を自由変数と固定変数に分割して近傍を定義する。自由変数は MIP モデルを用いて導出し、固定変数は暫定解の値で固定する。近傍の探索空間は、一般的な局所探索よりも大きくなる。そして、MIP モデルによって近傍内の最適解を導出する。そのため、この方法は現実的な計算時間で良質な解を導き出すことができる。このように大規模な近傍探索に MIP を適用した研究も存在する<sup>47, 49)</sup>。

この手法では、自由変数と固定変数の組み合わせを適切に選択することが重要である。MIP モデルの制約条件によって関連する変数を自由変数として選択することで、解の質の向上が期待される。そこで、自由変数と固定変数の組み合わせを選択するために、フィルタと呼ばれる新しい概念を導入する。フィルタは、自由変数と固定変数の組み合わせを定義するもので、複数のフィルタをあらかじめ用意しておく。フィルタは実行可能解によって、いくつかの変数を固定することで探索空間を縮小させる。このため、MIP モデルのみを用いる場合よりも計算時間の短縮が期待できる。また、この処理を何度も繰り返すことで解を更新し、短時間で良い解を導き出すことが期待される。

本手法の他にも大規模な最適化問題に対する解法はいくつか提案されている。第1章、第2章で示したようなヒューリスティクスを用いる手法や、田中の研究<sup>54)</sup>では Lagrange 緩和、列生成法、Benders 分解の3つの手法を紹介している。これらに対して本章で提案する手法はモデルに基づいてヒューリスティクスを取り入れることで、近傍定義が容易であり、また Lagrange 緩和などのように緩和する制約を選びモデルを書き換えるといった操作が不要である点がメリットである。

以上が MIP 近傍局所探索法の概要であり、フィルタが本研究の独自性である。関

連する研究として、ロットサイズ問題に MIP 近傍局所探索法を適用した事例が報告されている<sup>55)</sup>。ロットサイズ問題の構造は比較的単純であるため、通常は自由変数を自明な方法で選択する。しかし本研究が対象とする問題は、多くの変数と制約を持つ。そのため、この問題はロットサイズ問題よりも複雑で大規模である。このような問題に対して、適切なフィルタ設定を見つける必要がある。

### 5.3.2 提案する MIP 近傍局所探索法の手順

提案手法では、フィルタの適用が局所探索法における近傍の定義に相当し、フィルタによって縮小された部分問題を解くことが近傍解を選択することに相当する。

提案手法の解空間における処理手順を図 5.3、決定変数空間における処理手順を図 5.4 に示す。初期解を生成するために、数理計画法を用いて元問題の任意の実行可能解を導出する。局所探索法の各反復において、暫定解にフィルタを適用し部分解空間 (近傍に相当) を得る。この部分解空間はいくつかの変数を暫定解の値で固定することで定義される。その他の変数は自由変数であり、数理計画法によって解く。得られた解が次の反復の暫定解となる。以上の手順を繰り返しながら解を更新していく。

具体的には以下の手順で対象問題に対する準最適解を導出する。手順 (2)~(4) を繰り返すことで解を更新し、良質な解を導出する。

- (1) 数理計画法を用いて任意の実行可能解を導出し、初期解とする。また、最初の暫定解とする。
- (2) 暫定解に対してフィルタを適用し、決定変数を自由変数と固定変数に分割する。
- (3) 適用されたフィルタに従い、固定変数を暫定解で固定した部分問題を生成する。
- (4) 数理計画法を用いて生成した部分問題を解き、新たな暫定解を得る。

### 5.3.3 フィルタ設定

本手法では局所探索法の各反復において暫定解に対してフィルタを適用し、決定変数を自由変数と固定変数に分割する。一般に局所探索法では、近傍領域が大きいほど解の質が向上する<sup>47)</sup>。一方で計算時間が長くなるという問題がある。そこでフィルタを設定する際に、問題の規模や構造を考慮することで効率よく良い解を導き出すことを目指す。

MIP モデルにおいて、関連する変数の組み合わせを自由変数として選択することが、効率的に解を改善する推測される。その理由は独立した変数を自由変数として

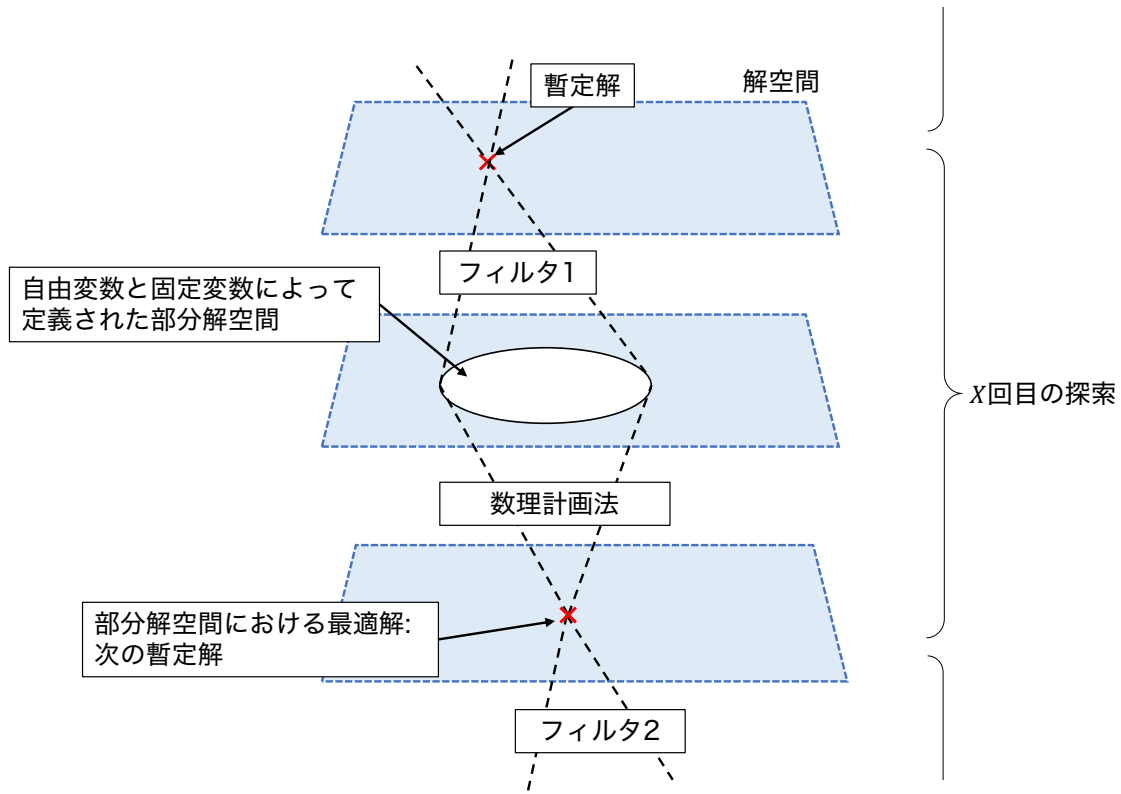


図 5.3: 解空間における探索

選択する場合、それぞれの変数を個別にフィルターとして選択する場合と同じような解が得られると推測されるからである。そこでMIPモデルの制約条件を考慮した上で、対象問題に対して5種類のフィルターを導入する。各フィルターの自由変数の組み合わせを表5.1に示す。開始時刻を固定すると目的関数値(納期余裕の総和)が変化しない。そのため全てのフィルターにおいて開始時刻を自由変数とする。フィルターAは使用する器具の割り当てに関する変数、フィルターDはフィルターBとCの組み合わせ、フィルターEはワークごとに自由変数として設定する。

## 5.4 検証

### 5.4.1 実験設定

提案したハイブリッド手法の有効性を検証するために、実際の問題を参考に作成した問題で計算機実験を行う。数理計画法のみで解いた結果と提案手法を用いて解いた結果を比較する。表5.2に対象問題のワーク数と納期を示す。規模が異なる大小2種類の問題A、Bで検証する。納期は全てのワークで同じとする。

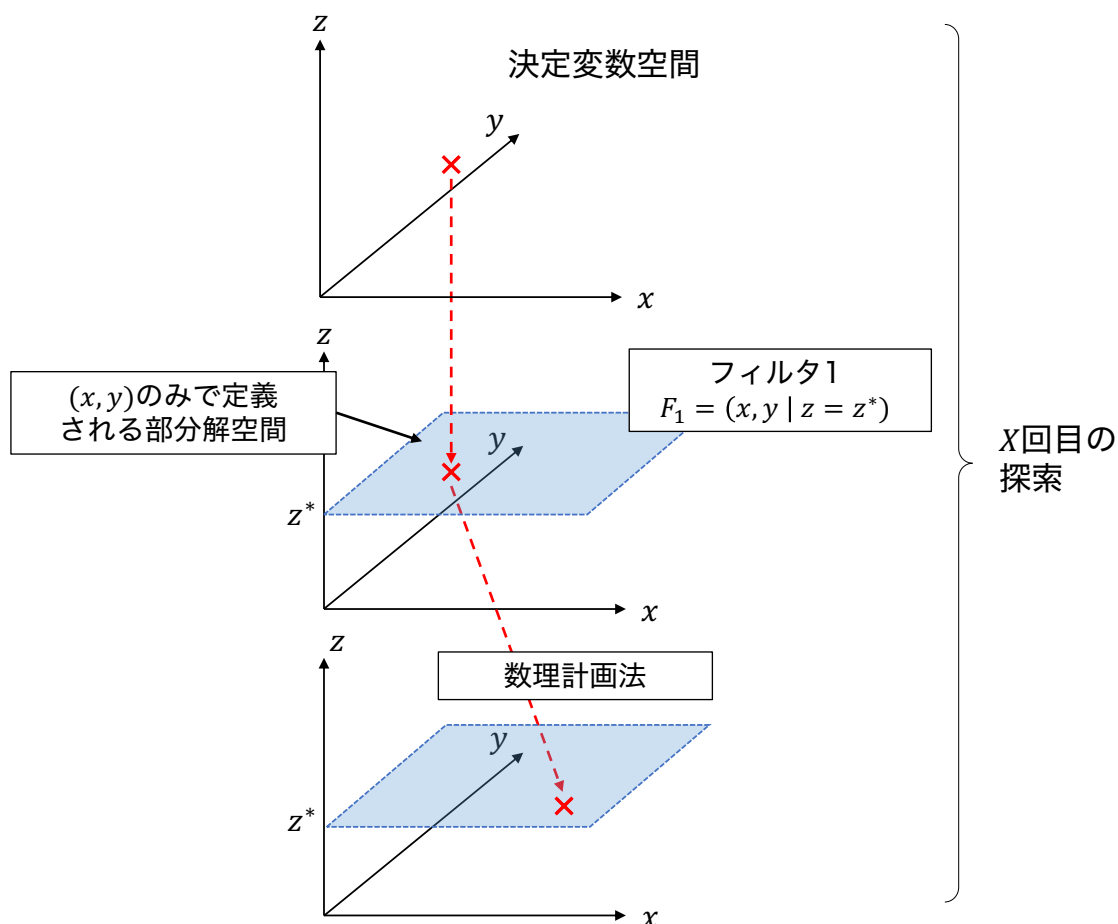


図 5.4: 決定変数空間における探索

パレットの初期状態として、スケジュールの開始前日までに全てのワークが取り外されており、ワークの取り付けから始める。作業者の作業可能時間は 9:00~17:00, そのうち 10:00~10:10, 12:00~12:45, 15:00~15:15 は作業ができない休憩時間である。同様に作業者が作業できない夜間は 17:00~9:00 である。

数理計画法のみによる求解と提案手法による求解について、以下の設定で行う。

**数理計画法** 問題の規模から最適解を導出することは現実的に困難であるため、数理計画法の最大計算時間を設定し 86,400 秒 (24 時間) とする。この設定の理由としてまず、1 日のスケジュールは朝までに作成する必要がある、計画通りに作業が進むことを前提とすると朝の時点でその日の最終的なパレット等の状態がわかっていることになる。そのため、翌日のスケジュールを前日の朝の時点で算出し始めることができ、最大 24 時間計算することができる。設定した時間内に最適解が見つからない場合、その時点での最良解で評価する。さらに提案手法との比較のため、MIP

表 5.1: フィルタの自由変数の組み合わせ

フィルタ	開始時刻	日付割り当て	作業順序	パレット割り当て	治具割り当て
A	○			○	○
B	○	○			
C	○		○		
D	○	○	○		
E	○	———任意のワークに関する決定変数———			

表 5.2: 対象問題のワーク数と納期

問題	ワーク数			納期
	1回加工	2回加工	3回加工	
A	4	4	0	7日目の 17:00
B	4	4	4	7日目の 17:00

近傍局所探索法での平均計算時間と同じ時間で数理計画法を用いて解を導出する。

**MIP 近傍局所探索法** 対象問題を数理計画法で解いて得られた実行可能解を初期解とする。初期解を導出するための計算時間は、問題規模に合わせて小規模な問題 A では 300 秒、大規模な問題 B では 3,600 秒に設定する。用意した複数のフィルタの中からランダムに選択されたフィルタに従って解を構成する変数を自由変数と固定変数に分け、自由変数のみの小規模な部分問題を生成する。フィルタ E は、あらかじめワークを複数のグループに分割しておき、その 1 つ 1 つをフィルタ E とする。問題 A, B に対して、それぞれ 3 種類、4 種類のフィルタ E を用意する。以上の 7~8 種類のフィルタ (フィルタ A~D と 3~4 種類のフィルタ E) の中から、等確率でランダムに 1 種類のフィルタを選択する。この際、前回のステップと同じフィルタが選ばれないようにする。そして生成された部分問題を数理計画法で解く一連の操作を一定回数繰り返す。設定された時間内に最適解が見つからない場合は、その時点の解を最適解として次のフィルタ選択に進む。各ステップにおいて導出された実現可能解の目的関数値 (納期余裕の総和) が前の解より小さい場合、その解は更新しない。

本検証ではフィルタの選択にランダム性がある。そこで対象問題に対してそれぞれ 10 回の実験を行い、平均値、最大値、最小値で評価する。

表 5.3: 対象問題に対する納期余裕の総和と計算時間

(a) 問題 A に対する結果			
		納期余裕の総和 [m]	計算時間 [s]
数理計画法	1 <sup>a)</sup>	72,374.0 (Dual gap 4.69%)	(300+) 4,313
	2 <sup>b)</sup>	72,407.5 (Dual gap 4.08%)	86,400
	平均値	71,917.4	(300+) 4,313
提案手法	最大値	72,241.0	(300+) 5,476
	最小値	71,405.5	(300+) 3,806

(b) 問題 B に対する結果			
		納期余裕の総和 [m]	計算時間 [s]
数理計画法	1 <sup>a)</sup>	73,293.5 (Dual gap 48.98%)	(3,600+) 5,310
	2 <sup>b)</sup>	76,030.5 (Dual gap 42.76%)	86,400
	平均値	93,126.4	(3,600+) 5,310
提案手法	最大値	94,785.0	(3,600+) 7,317
	最小値	91,322.0	(3,600+) 3,549

a) 提案手法の平均計算時間と同じ時間

b) 24 時間

\* 括弧内は初期解の生成時間

## 5.4.2 結果

表 5.3 は、対象問題に対して数理計画法と提案手法で得られた納期余裕の総和と計算時間である。なお前述の通り目的関数は納期余裕の総和の最大化であり、数値が大きい方が良いスケジュールと言える。

小規模な問題である問題 A について、同じ計算時間で導出された結果を比較すると、数理計画法の方が提案手法よりも 0.6%程度優れていることがわかる。しかし提案手法は数理計画法に近い解を導出できたと言える。さらに数理計画法の a) と b) の差が小さいことから、提案手法が小規模な問題にも有効であることを示している。

一方で大規模問題である問題 B について同様に、同じ計算時間内で導出された結果を比較すると、提案手法の方が約 27%優れており、さらに数理計画法を用いて 24 時間計算した結果よりも優れている。これらの結果から、提案手法が大規模問題に

対して計算量を大幅に削減しつつ、より良い解を得られることを示している。

大小、いずれの規模の問題に対しても提案手法は数理計画法と同等か優れた結果を示した。以上の結果からフィルタを用いた MIP 近傍局所探索法が様々な場面で活用でき、実用性があることがわかった。

フィルタの自由変数と固定変数の選択方法について、フィルタ A~D は変数の種類によって選択する一方で、フィルタ E はワークによって選択する。これらのフィルタの違いによる有効性を調べるため、問題 B に対してフィルタ A~D を使用した場合とフィルタ E を使用した場合で比較する。また、フィルタ D はフィルタ B と C の組み合わせであり、両方の効果を含むと予想し、フィルタ B と C を除外したフィルタ A, D, E での検証も行う。

表 5.4 に検証結果として納期余裕の総和を示す。フィルタ E を適用したものはフィルタ A~D を適用したものよりも劣っているが、フィルタ A~D を適用したものも、すべてのフィルタを適用したものよりも劣っている。したがってフィルタ E も多少必要であると言える。

フィルター A, D, E を適用した場合の結果は、全てのフィルターを適用した場合よりも多少良好であった。これは、フィルタ D がフィルタ B と C の両方を含んでいるためであると考えられる。従ってフィルタの適用回数を減らすことができ、探索効率が向上するため、少ないステップ数で良好な解を求めることができると言える。しかし全てのフィルタを適用した場合と比べて計算時間が増加している。これはフィルタ D の探索空間がフィルタ B および C より広いためと考えられる。そのため大規模な問題では、解を得るまでに多くの時間を要する可能性がある。つまりフィルタ B と C を導入することで計算時間を短縮できることを示している。

フィルタの選択確率について、表 5.3 と表 5.4 では、フィルタ A~D と 3 つまたは 4 つのフィルタ E との間の選択確率が等しくなっている。問題 B ではフィルタ E は 4 つのフィルタを含むため、フィルタ E のいずれかが選択される確率が高くなっている。そこでフィルタの種類ごとの選択確率を等しくして検証した。つまりフィルタ E のいずれかが選択される確率をフィルタ A~D と同じ  $\frac{1}{5}$ 、フィルタ E の個々のフィルタについては 4 つあるためさらにその  $\frac{1}{4}$  とした。表 5.5 に結果を示す。表 5.3 の (b) よりも納期余裕の総和が少し低い。この結果はフィルタの選び方が結果に影響していることを示しており、各フィルタの選択確率を適切に設定する必要があると言える。

本検証の結果から、様々なフィルタを用意しておく必要があることがわかった。これは広範囲の探索が可能となるためと考えられる。加えてフィルタの機能を考慮すると、決定変数の種類数が多い問題に対して有効であることが推測できる。

表 5.4: フィルタの効果に関する検証結果

フィルタ		納期余裕の総和 [m]	計算時間 [s]
A~E 全て	平均値	93,126.4	(3,600+) 5,310
	最大値	94,785.0	(3,600+) 7,317
	最小値	91,322.0	(3,600+) 3,549
A~D	平均値	91,251.8	(3,600+) 4,687
	最大値	93,542.5	(3,600+) 6,226
	最小値	88,664.0	(3,600+) 1,277
E	平均値	71,917.4	(3,600+) 4,313
	最大値	72,241.0	(3,600+) 5,476
	最小値	71,405.5	(3,600+) 3,806
A, D, E	平均値	93,606.4	(3,600+) 6,381
	最大値	94,736.0	(3,600+) 8,747
	最小値	91,649.0	(3,600+) 4,898

\* 括弧内は初期解の生成時間

## 5.5 おわりに

本章では MIP 近傍局所探索法に基づく、現実的な計算時間内で大規模な多制約問題の良好な解を導くハイブリッド手法を提案した。例として高度に自動化された製造施設における作業者の作業スタイルを考慮した加工スケジューリング問題に焦点を当てた。

現実に近い問題を対象とした検証の結果、提案手法が現実的な計算時間内で良質な解を導出できることが示された。本検証では数理計画法を用いて初期解を導出したが、メタヒューリスティクスを用いることでより大規模な問題にも適用可能である。

表 5.5: フィルタ E の選択確率に関する検証結果

	納期余裕の総和 [m]	計算時間 [s]
平均値	92,835.0	(3,600+) 4,821
最大値	94,717.5	(3,600+) 7,679
最小値	89,865.0	(3,600+) 1,603

本章では機械加工スケジューリング問題を取り上げた。一方で提案手法は局所探索法が利用可能な多くの種類の問題に適用可能であると考えられる。フィルタの導入によって MIP モデルの決定変数に基づいて局所探索における近傍を定義するため、問題に応じた近傍定義を設計する必要がない。したがって、本章で提案したハイブリッド手法は様々な問題に適用でき、社会システムに対しても同様に適用できると考える。

## 第 6 章

### 結論

#### 6.1 本論文のまとめ

本論文ではスマートシティなどの実現に向けて、社会システムの運用者の観点からのシミュレーション手法の検討を行った。対象システムがある設定の下で最大限得られる利益や振る舞いを示すことでそのシステム設定を評価し、システム運用の方針決定に寄与することを目的とした。数理計画モデルに基づくシミュレーション手法を提案し、複数の社会システムを対象として検討を行った。

第2章では、本論文が目指す最適化手法に基づくシミュレーションの概要について述べた。さらに個々の意思決定主体に着目したシミュレーション手法と異なり、システム運用者の視点からシステム設計に寄与するためのシミュレーション手法であることを整理した。また大規模な社会システムに対応するためのハイブリッド手法について、一般化した議論も行った。

第3章では、スマートグリッドを取り上げ、EV タクシーを活用した電力需給調整を行う新たなサービスの運用方法と実現可能性を検討した。対象サービスを数理計画モデルとしてモデル化し、システム設定にあたるバッテリーの性能などの定数を変え様々なシミュレーションを行うことで、EV タクシーの動きや得られた効果を示した。これにより提案手法がシステムの評価・設計に寄与することを示した。

第4章では、ごみ収集サービスの運用効率化を目指し、ヒューリスティック手法と数理計画法を組み合わせた手法を提案した。特にごみの収集に関する運用に着目し、ごみ捨て場の配置と収集ルートを最適化することで効率化を目指した。問題規模が大きくなるためヒューリスティクスを取り入れ、計算量を削減した。検証では実在する地域を対象として様々な設定でシミュレーションを行い、住民の利便性やごみ収集にかかるコストの変化を定量的に示した。以上の結果により提案手法が対象サービスの運用方針の決定において検討材料となることを示した。

第5章では、ヒューリスティック手法と数理計画法の融合に着目し、より複雑な問題である機械加工スケジューリング問題を対象として、これまでの提案手法の拡

張について議論した。本章では数理計画モデルの構造に着目し、変数同士が相互に影響するような複雑な問題に対しても本論文が提案するシミュレーション手法が有効であることを示すため、数理計画モデルに基づいてヒューリスティクスを取り入れたハイブリッド手法を提案した。検証によって本手法が短時間で良好な解が得られることを示した。

## 6.2 今後の課題

特に第5章で提案した大規模な社会システムに対する汎用的なシミュレーション手法について、様々な社会システムを対象とした検討を行いたい。また、本論文では得られた結果の評価はシステム運用者が行うことを想定しているため、実際に新たなシステムの実現に向けた検討において提案手法がどのように寄与するかについても議論したい。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり，きっかけを与えてくださるとともに，日頃の研究から論文作成まで，終始熱心なご指導を頂いた富山県立大学情報工学部データサイエンス学科 榊原一紀教授に厚く御礼申し上げます。

また，データサイエンス学科 中村正樹教授には，分析手法や結果考察において議論を賜りました際に，多くの知識や示唆を頂きました。深く感謝致します。

電気電子工学科 小島千昭准教授をはじめ，小島研究室の皆様には，特にスマートグリッドに関する研究を進めるにあたり，ご協力を頂きました。深く感謝致します。

環境・社会基盤工学科 立花潤三准教授をはじめ，立花研究室の皆様には，特にごみ収集サービスに関する研究を進めるにあたり，ご協力を頂きました。深く感謝致します。

データサイエンス学科 松本卓也准教授，高野諒助教には研究全般に関して様々なアドバイスを頂き，日頃からお世話になりましたことを御礼申し上げます。

室蘭工業大学 渡邊真也教授には，特にスケジューリングに関する研究を進めるにあたり，進化計算などの観点から様々なアドバイスを頂きました。深く感謝致します。

各研究を進めるにあたり，データを提供頂いた北陸電力株式会社の担当者様，南砺市の担当者様，津田駒工業株式会社の担当者様に感謝申し上げます。



## 参考文献

- 1) 内閣府: Society 5.0, [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/), 2024.
- 2) 貝原 俊也: 社会シミュレーションによる政策立案への接近, 計測と制御, Vol.62, No.1, pp.27-32, 2023.
- 3) 村田 忠彦, 原田 拓弥: リアルスケール社会シミュレーションのためのモデリングとインテリジェンス, 計測と制御, Vol. 63, No. 10, pp. 640-645, 2024.
- 4) 金月 寛彰, 服部 宏充: マルチエージェントシミュレーションによるタクシー営業戦略の改善シナリオの提案, 人工知能学会論文誌, Vol. 34, No. 3, pp. C-IA2\_1-9, 2019.
- 5) 木村 圭佑, 小林 健一郎: マルチエージェントシミュレーションによる西宮広域津波避難訓練の再現と考察, 土木学会論文集 B1 (水工学) , Vol. 71, No. 4, pp. I.1375-I.1380, 2015.
- 6) G. G. D. Santos, G. H. de Almeida Correia: “Finding the relevance of staff-based vehicle relocations in one-way carsharing systems through the use of a simulation-based optimization tool”, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 23, No. 6, pp. 583 – 604, 2019.
- 7) 玉置 久: システム最適化, オーム社, 2005.
- 8) 内閣府: 内閣府における EBPM への取組, <https://www.cao.go.jp/others/kichou/ebpm/ebpm.html>, 2025.
- 9) 喜多 一: スマートコミュニティへのエージェントアプローチの可能性, 電気学会全国大会講演論文集, 1-H1-7, 2015.
- 10) 後藤 裕介: エージェントベース社会シミュレーションによる社会共創アプローチ, 感性工学, Vol. 21, No. 2, pp. 84-91, 2023.
- 11) 森田 浩: ハイブリッド・スケジューリング法, スケジューリング・シンポジウム 2005 講演論文集, pp. 20-25, 2005.
- 12) 一般社団法人電気学会: スマートグリッドと EMC -電力システムの電磁環境設計技術-, 科学情報出版株式会社, 2017.
- 13) 井村 順一, 原 辰次: 次世代電力システム設計論, 株式会社オーム社, 2019.

- 14) 横山 明彦, 合田 忠弘, 林 泰弘, 浅野 浩志, 坂東 茂, 今井 伸一, 林 秀樹, 木槻 純一, 新井 正伸, 山田 竜也, 姉川 尚史, 弥栄 邦俊: スマートグリッドの構成技術と標準化, 一般財団法人日本規格協会, 2012.
- 15) 株式会社伊藤忠総研: 中国経済情報 2020 年 8 月号,  
[https://www.itochu-research.com/ja/uploads/20200831\\_C.pdf](https://www.itochu-research.com/ja/uploads/20200831_C.pdf), 2020.
- 16) ヤマト運輸株式会社: ヤマト運輸と CJPT、カートリッジ式バッテリー規格化・実用化に向けた検討開始,  
[https://www.yamato-hd.co.jp/news/2022/newsrelease\\_20220727\\_1.html](https://www.yamato-hd.co.jp/news/2022/newsrelease_20220727_1.html), 2022.
- 17) 滑川 徹: システム制御による超スマート社会へのアプローチ, 計測と制御, Vol. 57, No. 7, pp. 497-500, 2018.
- 18) 水野 敬介, 滑川 徹: 待ち行列を考慮したモデル予測制御に基づく EV 充電最適スケジューリング算出と電力潮流最適化, 自動制御連合講演会講演論文集, Vol. 61, pp. 459-465, 2018.
- 19) 若佐 裕治, 仲谷 聡介: 主双対摂動法に基づく分散最適化による電力負荷スケジューリング, システム制御情報学会論文誌, Vol. 29, No. 6, pp. 250-257, 2016.
- 20) 金森 亮, 川口 将吾, 伊藤 孝行: エージェントシミュレーションによるコミュニティに基づく電力マネジメントモデルの有効性の検証, 人工知能学会全国大会論文集, Vol. JSAI2013, pp. 4F16, 2013.
- 21) 恩田 悠永, 田添 崇士, 山本 草詩, 竹下 秀俊, 岡本 聡, 山中 直明: 電気自動車のバッテリー仮想化による電力需要のピークシフト実現および電気料金削減手法, 電子情報通信学会信学技報, Vol. 113, No. 424, pp. 13-18, 2014.
- 22) R. Das, K. Thirugnanam, P. Kumar, R. Lavudiya, M. Singh: “Mathematical Modeling for Economic Evaluation of Electric Vehicle to Smart Grid Interaction”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, No. 2, pp. 712-721, 2014.
- 23) K. N. Kumar, B. Sivaneasan, P. H. Cheah, P. L. So, D. Z. W. Wang: “V2G Capacity Estimation Using Dynamic EV Scheduling”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, pp. 1051-1060, 2014.
- 24) 電気事業連合会: 電力事情について 日本の電力消費,  
<https://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyoku/japan/>, 2020.
- 25) IBM: ILOG CPLEX Optimizer,  
<https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/>, 2020.

- 26) 環境省: 一般廃棄物処理事業実態調査の結果(令和元年度)について, 2021.
- 27) 環境省: 一般廃棄物処理有料化の手引き, 2013.
- 28) 立花 潤三, 森 卓哉, 宮窪 航希, 松崎 仁平, 榊原 一紀: 住民意識を考慮したごみ集積所の配置計画モデルの開発, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 77, No. 5, pp. I.317-I.323, 2021.
- 29) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三: 数理計画モデルと地理データによるゴミ回収サービスの定量評価, 電気学会論文誌 C, Vol. 141, No. 12, pp. 1380-1387, 2021.
- 30) OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/>, 2021.
- 31) 鈴木 勉: 既存施設を活用した都市施設の再配置モデル, 都市計画論文集, Vol. 46, No. 3, pp.421-426, 2011.
- 32) 柳本 哲也, 大場 和久, 井上 和夫: 都市施設配置問題に対する遺伝アルゴリズムの構成法, システム制御情報学会論文誌, Vol. 13, No. 3, pp. 141-148, 2000.
- 33) 小泉 明, 戸塚 昌久, 稲員 とよの, 川口 士郎: 都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル, 土木学会論文, Vol. 1992, No. 443, pp. 101-107, 1992.
- 34) 藤野 和徳: 遺伝的アルゴリズムによるごみ収集輸送計画, 土木学会論文集, Vol. 1997, No. 558, pp. 139-146, 1997.
- 35) 松中 亮治, 谷口 守, 板垣 大介: 施設配置を考慮した可燃ごみ収集・運搬計画の最適化に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 147-153, 2006.
- 36) 松中 亮治, 谷口 守, 板垣 大介: 一般廃棄物処理計画における収集・運搬の最適化に関する実証的研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 93-99, 2008.
- 37) L. C. Yeun, W. R. Ismail, K. Omar, M. Zirour: "Vehicle Routing Problem: Models and Solutions", *Journal of Quality Measurement and Analysis*, Vol. 4, No. 1, pp. 205-218, 2008.
- 38) S. Barreto, C. Ferreira, J. Paixão, B. S. Santos: "Using Clustering Analysis in a Capacitated Location-Routing Problem", *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, No. 3, pp. 968-977, 2007.
- 39) M. Hachicha, M. J. Hodgson, G. Laporte, F. Semet: "Heuristics for the Multi-vehicle Covering Tour Problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 29-42, 2000.
- 40) 立花 潤三, 春名 攻: リサイクルを考慮した一般廃棄物処理システム計画に関するモデル分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, No. 1, pp. 187-194, 2001.
- 41) 三宮 信夫, 玉置 久, 喜多 一, 岩本 貴司: 遺伝アルゴリズムと最適化, 朝倉書店, 1998.

- 42) 藤井 実, 村上 進亮, 南齋 規介, 橋本 征二, 森口 祐一, 越川 敏忠, 齋藤 聡: 家庭系容器包装プラスチックごみの収集と運搬に関する評価モデル, 廃棄物学会論文誌, Vol. 17, No. 5, pp. 331-341, 2006.
- 43) 伊理 正夫, 今野 浩, 刀根 薫: 最適化ハンドブック, 朝倉書店, 1995.
- 44) 藤井 実, 村上 進亮, 南齋 規介, 橋本 征二, 森口 祐一, 中村 卓也, 越川 敏忠: 家庭系ごみの分別収集に係わる収集車の走行距離・台数等の調査, 廃棄物学会論文誌, Vol. 18, No. 6, pp. 443-453, 2007.
- 45) 国土交通省: 自動車損害賠償責任保険料（共済掛金）表, 2020.
- 46) ゼンリン: Zmap-TOWN II  
<https://www.zenrin.co.jp/product/category/gis/basemap/zmaptown/index.html>
- 47) M. Gendreau, J. Y. Potvin: Handbook of Metaheuristics. Springer, 2010.
- 48) I. Boussaïd, J. Lepagnot, P. Siarry: “A survey on optimization metaheuristics”, *Information Sciences*, Vol. 237, pp. 82-117, 2013.
- 49) W. Jaśkowski, M. Szubert, P. Gawron: “A hybrid MIP-based large neighborhood search heuristic for solving the machine reassignment problem”, *Annals of Operations Research*, Vol. 242, pp. 33-62, 2015.
- 50) E. Danna, E. Rothberg, C. Pape: “Exploring relaxation induced neighborhoods to improve MIP solutions. Mathematical Programming”, Vol. 102, pp. 71-90, 2005.
- 51) M. L. Pinedo: Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Springer, 2016.
- 52) 中田 康佑, 澤枝 良樹, 角田 裕也, 榊原 一紀, 中村 正樹: 混合整数計画モデルに基づくメタヒューリスティックスと数理計画法のハイブリッド型最適化技法, 進化計算学会論文誌, Vol. 12, No. 3, pp. 61-72, 2021.
- 53) P. Shaw: “Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problem”, *Principles and Practice of Constraint Programming - CP98*, Vol. 1520, pp. 417-431, 1998.
- 54) 田中 俊二: 大規模組合せ最適化問題に対する数理アプローチの基礎, 計測と制御, Vol. 56, No. 12, pp. 967-972, 2017.
- 55) M. Caserta, S. Voß: “A MIP-based framework and its application on a lot sizing problem with setup carryover”, *Journal of Heuristics*, Vol. 19, pp. 295-316, 2013.

# 本研究に関する発表

## 論文発表

- (1) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三: 数理計画モデルと地理データによるゴミ回収サービスの定量評価, 電気学会論文誌 C, Vol. 141, No. 12, pp. 1380-1387, 2021.
- (2) 立花 潤三, 森 卓哉, 宮窪 航希, 松崎 仁平, 榊原 一紀: 住民意識を考慮したごみ集積所の配置計画モデルの開発, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 77, No. 5, pp. I.317-I.323, 2021.
- (3) 松崎 仁平, 朝倉 弘達, 永山 悠, 小島 千昭, 榊原 一紀, 川村 裕直: EV タクシーの運用および充放電に対する全体最適化モデルとその評価, 電気学会論文誌 C, Vol. 143, No. 5, pp. 554-561, 2023.
- (4) 榊原 一紀, 中田 康佑, 松崎 仁平, 中村 正樹: 数理計画法とメタヒューリスティクスのハイブリッド型最適化によるローリング・スケジューリング: 機械加工スケジューリング問題を対象として, システム制御情報学会論文誌, Vol. 36, No. 6, pp. 172-178, 2023.
- (5) Jin Matsuzaki, Kazutoshi Sakakibara, Masaki Nakamura and Shinya Watanabe: “Large neighborhood local search method with MIP techniques for large-scale machining scheduling with many constraints”, *The Journal of Supercomputing*, Vol. 80, No. 9, pp. 12297-12312, 2024.
- (6) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三, 中村 正樹: ゴミ収集・運搬サービスを対象としたステーション配置および経路の同時最適化, 電気学会論文誌 C, Vol. 144, No. 4, pp. 363-371, 2024.
- (7) 小島 千昭, 大井 滉介, 石樽 大晟, 松崎 仁平, 阿久津 慧, 榊原 一紀, 齋藤 正史, 川村 裕直: マイクログリッドにおけるシュタッケルベルグゲームに基づく EV 充電量・価格交渉と充電スポット選択の最適化モデル, システム制御情報学会論文誌 (掲載決定).

## 国際会議

- (1) Jin Matsuzaki, Kazutoshi Sakakibara, Masaki Nakamura: “The MIP-based large neighborhood local search method for large-scale optimization problems with many constraints: Application to the machining scheduling”, *The Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC)*, 2022.
- (2) Jin Matsuzaki, Kazutoshi Sakakibara, Masaki Nakamura, Shinya Watanabe: “A large neighborhood local search method incorporating MIP techniques for large-scale optimization problems with many constraints: Application to the machining scheduling”, *The 29th Int’l Conf on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications: Workshop on Mathematical Modeling and Problem Solving (PDPTA’23, MPS144)*, 2023.

## 口頭発表

- (1) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三: 地理データと数理計画モデルによるゴミ回収サービスの評価技法の開発, 計測自動制御学会第 22 回社会システム部会研究会, 2020.
- (2) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三: 数理計画モデルと地理データによるゴミ回収サービスの定量評価, 電気学会情報システム研究会, 2020.
- (3) 松崎 仁平, 朝倉 弘達, 小島 千昭, 榊原 一紀, 浜下 祐輔, 橋本 茂男, 杉本 仁志: EV タクシーの運用および充放電に対する全体最適モデルとその評価, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 2020 (SSI2020), 2020.
- (4) 松崎 仁平, 朝倉 弘達, 永山 悠, 小島 千昭, 榊原 一紀, 浜下 祐輔, 橋本 茂男, 杉本 仁志: EV タクシーのための充放電ネットワーク全体最適化モデル, 第 63 回自動制御連合講演会, 2020.
- (5) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三, 中村 正樹: 住民の利便性および回収コストを反映したゴミ回収サービスの数理計画モデル, 電気学会情報システム研究会, 2021.
- (6) 松崎 仁平, 森 耕平, 宮窪 航希, 内藤 日向子, 榊原 一紀, 立花 潤三, 中村 正樹: 住民アンケートを反映したゴミ回収サービスの設計のための数理計画モデル, 第 65 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2021.

- (7) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三, 中村 正樹: ゴミ回収サービスにおけるステーション配置および回収ルート of の同時最適化技法の検討, 2021 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2021.
- (8) 永山 悠, 松崎 仁平, 朝倉 弘達, 小島 千昭, 榊原 一紀, 浜下 祐輔, 橋本 茂男, 杉本 仁志: EV タクシーを介した充放電ネットワークの最適化モデル, 2021 年電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2021.
- (9) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 立花 潤三, 中村 正樹: ゴミ回収サービスにおけるステーション配置および回収ルート of の同時最適化, 2021 年電気学会システム研究会優秀論文講演会兼優秀論文発表賞 A 選考会, 2021.
- (10) 松崎 仁平, 榊原 一紀, 中村 正樹, 渡邊 真也: MIP 近傍局所探索法による多制約かつ大規模問題の最適化, 進化計算シンポジウム 2022, 2022.
- (11) 奥澤 健冴, 永山 悠, 松崎 仁平, 小島 千昭, 榊原 一紀, 齋藤 正史, 川村 裕直: シュタッケルベルグゲームに基づく太陽光発電による地域余剰電力を介した EV 充放電の最適化, 第 66 回自動制御連合講演会実行委員会, 2023.