

工事立会者手配業務に対する
数理モデルと実践的解法

高須賀 将秀

工事立会者手配業務に対する
数理モデルと実践的解法

高須賀 将秀

名古屋大学大学院
情報学研究科



名古屋大学

2023年3月

まえがき

近年、通信技術や情報技術の発展により、今まで人手で行ってきた業務が計算機等で行う業務に代わりつつあり、デジタル化が進んでいる。それに伴い、人手で行ってきた意思決定も、デジタル情報を用いた計算機等と人手によるハイブリッドな方法に年々変化している。計算機を用いて意思決定の支援を行うためには、意思決定の過程を数理モデルとして表現し、その数理モデルを解くための実践的解法が必要となる。しかしながら、この過程を数理モデルとして表現したり、実践的解法を実装することは容易ではない。その理由の1つとして、実社会の要件は多様であり、少し要件が異なるだけで異なる数理モデルになり、それを解くための実践的解法も異なる場合が多いため、解決したい問題が現れるたびにモデル化と解法開発が必要になって、その都度大きな労力が必要になってしまうことが挙げられる。また、数理モデルや実践的解法の研究を行う立場の人と、実社会で日々それらの課題に直面している現場の人はその間の交流が少ないため、実社会への活用に向けた検討に至りづらい。そのため、2つの立場に関わり、数理モデルや実践的解法の活用事例を増やしていくことが求められている。本稿では、実社会に存在する課題を解決する試みの一環として、日本電信電話株式会社で行っている意思決定の業務の一事例を取り上げ、数理モデルとそれに対する実践的解法を検証した結果について述べる。

近年、道路などのインフラの老朽化は深刻な社会問題となっており、補修工事が日々行われている。そのような工事を行うときに日本電信電話株式会社の設備を傷つけてしまうことを防ぐため、各工事に日本電信電話株式会社の社員が立ち会うようにしている。そのため、各工事にどの社員を割り当てるかを定める必要がある。その際、難易度の高い工事が1人の社員に集中していないかなどを考慮している。また、各社員が担当する工事をすべて巡回したときの総移動時間を小さくしたいという要望や、スキルの低い人に難しい工事を割り当てると事故が起こりやすくなるため各工事を適切なスキルを持つ人に割り当てたいという要望など、様々な要望を考慮する必要がある。そのため、実社会の工事の割当ての意思決定には高度な技能が必要になる。

本稿では、高度な技能を有している手配者と呼ばれる専門家により意思決定が行

われている工事立会者手配業務に対し、実用的な手配結果を算出可能な数理モデルを提示する。また、手配者がコメントした点を改善するように数理モデルを修正するに従い、算出される解と手配者が手作業で作成した手配結果との相違度が減少することを数値実験により示す。

さらに、そのような数理モデルに対して、実行可能なルート候補の全列挙に基づく集合被覆アプローチによる定式化、制約生成法に基づく定式化、および実行可能なルート候補を削減した集合被覆アプローチによる定式化に対して汎用ソルバーを用いて求解する手法の比較検証を行う。計算実験により、それらの手法によって現実的な時間で良質の解を得ることを確認した。

これらにより、実社会に存在する工事立会者手配業務に対して、手配者の意思決定の支援を行うためのモデルの構築と、実践的な解法を示すことができた。これらの結果は特定の事例に対する限られた実験結果に基づいており、広く応用できる一般的な知見を得るには、より多くの事例やデータに対する検証が必要ではあるが、類似の問題を解決する上で有益な知見を与えられると思われる。本稿で述べた数理モデルと実践的解法の構築の記述や考え方が、そのような場面において貢献できれば幸いである。

2023年3月
高須賀 将秀

目次

第1章	はじめに	1
第2章	工事立会者手配問題について	4
第3章	工事立会者手配問題の数理モデル	8
3.1	定式化	8
3.2	結果に対する評価	10
第4章	数理モデルの比較と検証	12
4.1	検証に用いる数理モデルと得られる解について	12
4.2	目的関数による手配結果の比較	20
4.3	手配結果の相違度について	22
4.3.1	工事間の移動ルートに関する解の相違度	22
4.3.2	工事の立会者への割当に関する解の相違度	23
4.3.3	解の相違度の重み付き和	23
4.3.4	現実の工事データに対する手配結果の比較	24
第5章	工事立会者手配問題の種々の定式化に基づく求解法	31
5.1	集合被覆アプローチによる定式化	31
5.1.1	定式化	32
5.2	制約生成法に基づく定式化	32
5.2.1	巡回セールスマン問題に対する制約生成法	32
5.2.2	工事立会者手配問題への適用	33
5.3	実行可能なルート候補を削減した集合被覆アプローチによる定式化	36
第6章	計算実験	37
6.1	計算環境と問題例	37
6.2	制約生成法の計算結果	37
6.3	集合被覆アプローチの計算結果	41

6.4 制約生成法と集合被覆アプローチの比較	43
第7章 まとめ	50
謝辞	52
参考文献	54
主著論文	58
その他論文	60

表 目 次

6.1	制約生成法における制約追加方針と部分巡回路除去制約の比較 ($W = 9$)	39
6.2	制約生成法における制約追加方針と部分巡回路除去制約の比較 ($W = 18$)	40
6.3	集合被覆アプローチにおけるルート生成法の比較 ($W = 9$)	43
6.4	集合被覆アプローチにおけるルート生成法の比較 ($W = 18$)	44
6.5	CG と Enum+ の比較結果 ($W = 9$)	46
6.6	CG と Enum+ の比較結果 ($W = 18, S \geq 4$)	47
6.7	CG と Enum+ の比較結果 ($W = 18, S \leq 3$)	47
6.8	CG と Enum+ の比較結果 ($W = 36, S = 3, J \leq 29$)	48
6.9	CG と Enum+ の比較結果 ($W = 36, S = 3, J \geq 30$)	49

目次

2.1	工事立会者手配問題に対する手配者による手配結果	7
3.1	工事立会者手配問題に対する数理モデルによる手配結果 ($\alpha = 50$)	11
4.1	工事立会者手配問題に対する数理モデル1による手配結果	14
4.2	工事立会者手配問題に対する数理モデル2による手配結果	16
4.3	工事立会者手配問題に対する数理モデル3による手配結果 ($\alpha = 40$)	18
4.4	工事立会者手配問題に対する数理モデル3による手配結果 ($\alpha = 190$)	19
4.5	数理モデルと項番の対応および総移動時間と総割当ペナルティの散布図	21
4.6	解の相違度行列 \hat{H}_A	25
4.7	解の相違度行列 \hat{H}_B	27
4.8	解の相違度行列 \hat{H}_C ($\beta = 0.4208$)	30
6.1	CG1-(5.2.14) の上界と下界 ($ J = 18, S = 7, \nu = 8, W = 18$)	41

第1章 はじめに

日本電信電話株式会社 (以後 NTT) は、日本の電気通信会社で、総合情報通信技術事業、地域通信事業、グローバル・ソリューション事業およびその他不動産、エネルギー等の事業を行っている [1]。その中でも、地域通信事業は、電気やガス等のように人々の生活に欠かせない重要な事業である。その地域通信を支えるインフラ設備は NTT が保全を行っている。具体的には、約 1,186 万本の電柱、約 68 万個のマンホール、約 651 km のとう道、約 224 万 km のケーブル、約 62 万 km の管路がある [2]。そのため、経年劣化等により、日々多くの補修工事が必要になる。NTT では、NTT の社員が立会を行うことで、これらのインフラ設備の保全を行っている。

近年、道路等のインフラの老朽化は深刻な社会問題となっており、施設保全度の確保およびライフコストの縮減と予算の平準化を図るため、道路施設の点検及および補修工事が計画的に行われている [3]。道路には地下ケーブルや水道管等の重要なインフラ設備が埋まっているため、設備の知識を有した人が工事を行うことが望ましいが、工事を行う人はインフラ設備に関する知識を有していない。そのため、各インフラ設備の所有者が工事に立ち会うことでそれらを傷つけることを防いでいる [4]。地下ケーブルの一部は NTT が有しており、立会が必要な工事には NTT の社員が立ち会っている [5, 6, 7]。

このとき、各工事に立ち会う社員 (以後立会者) を割り当てる必要があるが、実社会では最適化手法を用いて割当を決定しているわけではなく、工事の割当を行うスキルを持った意思決定者 (以後手配者) が、いくつかのルールや経験則に基づいて割当を行っている。ルールには、例えば、1つの工事に対して割り当てる立会者は1人など、明確なものもあれば、難易度の高い工事を1人に集中させないようにするなどの曖昧なものも存在する。また、手配者が手配結果の良し悪しを判断する基準についても、目的関数に含めるべき指標は複数あるが、各指標の重要度は曖昧である。指標には、1人の立会者が担当する複数の工事間の移動時間を短くしたい、スキルの低い人に難易度の高い工事を割り当てると事故が起りやすくなるため各工事を適切なスキルを持つ人に割り当てたいなど、いくつかの要望に対応するものがあるが、これらの複数の指標はトレードオフの関係になることが多く [8, 9, 10]、いずれの指

標をどの程度重視すれば良いかに関する明確な基準があるわけではない。どの指標をどの程度重視すべきであるかは、工事の数や場所、および工事に割り当てる立会者の数やスキルなどによって異なり、現状では手配者の勤と経験に任されている。

このような状況で工事に対する立会者の割当を定めることは容易ではない [11]。実際、手配者はこの業務に膨大な時間を割いている。そこで、数理最適化手法を活用し [12, 13]、手配案の候補を自動的に算出することで、手配者の意思決定の支援を行い、この手配業務に要する時間の削減を図る。実社会問題を定式化するためには、ルールを熟知している現場の人とそのルールを定式化する専門家との意識のすり合わせが不可欠である [14, 15, 16]。そのため、実社会問題の数理モデルを構築するためには膨大な時間とコストを要する。

本稿では、現場の手配者にヒアリングを実施し、試行錯誤を繰り返しながら数理モデルの構築および改善を行った事例を紹介する。また、その過程で得られたいくつかの数理モデルによる解を、解の間の相違度 2 種とその重み付き和に基づいて、手配者が作成した解と比較検討した結果についても述べる。

さらに、そのような数理モデルに対して、実行可能なルート候補の全列挙に基づく集合被覆アプローチによる定式化、制約生成法に基づく定式化、および実行可能なルート候補を削減した集合被覆アプローチによる定式化に対して汎用ソルバーを用いて求解する手法の比較検証を行い、現実的な時間で良質の解を得ることを確認する。

本稿は全 7 章から構成される。各章で述べる内容は次のとおりである。本章では、工事立会者手配問題に対する研究背景を述べた。第 2 章では、工事立会者手配問題を理解する上で必要な知識と定義を与える。第 3 章では、第 2 章で述べた工事立会者手配問題を数理計画問題として定式化する。この数理モデルは手配者に対するヒアリングを通して明らかになった制約や要望を全て盛り込んだものである。第 4 章では、数理モデルに対する手配者の評価結果と相関のある客観的な指標について検証する。その候補として、現場の手配者による手配結果と数理モデルで得られる結果がどの程度近いかに注目する。手配結果の間のそのような距離の測り方には自由度があるため、測り方による傾向の違いについても検証する。第 5 章では、第 3 章で定義した工事立会者手配問題のいくつかの定式化と、それに基づく求解法について述べる。第 3 章の定式化とは異なる定式化として、実行可能なルート候補の全列挙に基づく集合被覆アプローチによる定式化、制約生成法に基づく定式化、および実行可能なルート候補を削減した集合被覆アプローチによる定式化を考え、それらに対して汎用ソルバーを用いて求解する手法について述べる。第 6 章では、第 5 章で述べた工事立会者手配問題の種々の定式化に基づく求解法に対する計算実験の方

法とその結果を述べる。また、実験結果に基づき、これらを実践的に利用する方法についても考察する。最後に、第7章で本研究の結論を述べる。

第2章 工事立会者手配問題について

与えられた全ての工事に対して立会者の割当を決定する問題を本稿では工事立会者手配問題と呼ぶ。以下に本研究で対象とする工事手配の現状と人手による手配業務について述べる。まず、工事立会者手配業務の現状は以下のようである。

- 工事は1日で昼と夜の2回に分けられており、年間で約300日実施されている。
- エリア数や工事数は地域によって異なるが、東京、神奈川、千葉、埼玉からなる関東ブロックは約10エリア [5] に分けられており、本研究で対象としたエリアを含むブロック全体で年間約24万件以上の工事の立会を行っている。
- 1つのエリアでは手配者が1回あたり40件から60件の工事の手配を3時間から4時間の時間をかけて手作業で行っている。そのため、工事の手配を行う手配者の稼働時間は膨大となり、ブロック全体で年間約1億円近くのコストを人件費に費やしている。
- 多くの件数の工事の手配を日々人手で行っているため、工事に要求されるスキルレベルよりもスキルの低い立会者を割り当ててしまうこともあり、その結果重要なインフラ設備を傷つけてしまう事故が年間に数件発生している。
- 手配を行うスキルを持った手配者は1つのエリアに数人しかおらず、工事立会者手配業務は属人化しており、将来的には労働人口の減少や工事立会者手配業務のエリア集約が行われることが想定されるため、工事立会者手配業務の自動化を行っていく必要がある。

次に、人手による手配業務について説明する。手配者は工事手配を行う際、以下の事前準備、工事手配の決定、事後作業の3つの工程を実施する。

事前準備

- 国から道路等の舗装依頼に関する工事情報が1回100件近くFAXやメールにて送信される。

- 立会者の人員リソース状況から60件より多くの工事全てに立ち会うことは困難であるため、真に立会が必要な工事を精査し、60件以下、できれば40件近くまで工事数を削減する。
- 地図を印刷した紙の上に透明なアクリル板を載せ、水性ペンを用いて住所情報を元に立会すべき工事を地図上に点をつけて記す。

工事手配の決定

- 地図上に記された点が1つから3つになるようにグループ分けを行う。
- 分けられたグループをいずれの立会者が担当するかを決定する。
- 工事に関する知識やスキル不足などの理由から、あるグループの工事に対して適当な(すなわちそのグループの全ての工事を担当可能な)立会者がいない場合、グループ分けを再度やり直す。

事後作業

- 工事の手配結果を描写した地図を工事立会者に見てもらい、各立会者は担当工事を記憶し、工事現場に向かう。
- 工事の手配結果を描写した地図の写真を撮り、データ化する。次の工事立会者手配業務を行うために、アクリル板上に書かれた情報を消去する。

人手で工事手配を行う際には、このように、まず地図上に点で記された工事を、3つ以下の工事より成るグループに分けたのち、各グループに立会者を割り当てる。立会者は、事務所を出発して、3つ以下の工事を数回巡回した後、事務所に戻ってくる。このとき立会者は、工事が正常に進捗していることを確認し、必要に応じて指示を出すことが役割であるため、工事が開始してから終了するまで張り付いて立ち会うわけではない。つまり、各工事を1回ずつ訪れたのち事務所に戻るのではなく、1時間に1回程度各工事の様子を見回りに行く。その結果担当する工事の間を何度も巡回する必要があるため、事務所を除いて担当する工事のみを回る巡回路の移動時間の全ての立会者に対する和を小さくしたいという要望がある。また、各工事には3段階の難易度が設定されており、各グループ内の工事の難易度の和が8以下となるようにしている。

各グループへの立会者の割当の決定は、各立会者が各工事に対して持っているスキルレベルの情報に基づいて行われる。ある工事に対して、その工事に対するスキルの低い立会者を割り当てると事故が起こりやすくなるため、そのような割当をできるだけ避けたいという要望がある。

手配者が工事手配を行う際には、上述のようにまずグループ分けを行ってからグループに対する立会者を決めるという順序で行っているが、これは、全ての目的や制約を考慮して手配を行うことが人手では難しいためであり、本来は、全ての目的や制約を考慮した上で工事のグループ分けと立会者の割当を同時に最適化することが望ましい。

本研究では、過去に現場の手配者が実際に割当を行った実データを用いた計算実験により数理モデルなどの検証を行う。具体的には、36件の工事と14人の立会者から成る実データである。工事に住所情報のみが与えられているため、Directions API (Google Maps Platform) を用いて工事間の移動時間を取得した [17]。また、現場の手配者からのヒアリングにより、各立会者のスキルレベルと各工事の難易度の情報を得た。図 2.1 は現場の手配者が実際に割当を行った結果である。左の地図上の旗印は各工事の位置を表し、旗の色が同じ工事は同じ立会者に割り当てられたことを表す。右の表は各立会者に割り当てられた工事の番号と、それらを回る巡回路の移動時間、それらの工事に求められるスキルレベルからの乖離を表す割当ペナルティ、および割り当てられた工事の難易度の合計を示している。

立会者	T1	T2	T3	合計移動時間	合計割当ペナルティ	合計難易度
A	15	16	-	900	7	5
B	1	2	3	638	13	8
C	4	5	6	518	16	8
D	7	8	9	886	12	8
E	10	11	12	564	17	8
F	13	14	-	586	12	4
G	17	18	19	825	18	8
H	20	21	-	1098	9	5
I	22	23	24	604	12	8
J	25	26	27	1115	13	7
K	28	29	30	916	13	7
L	31	32	-	1276	9	5
M	33	34	-	796	8	5
N	35	36	-	702	4	5
総				11424	163	91

図 2.1: 工事立会者手配問題に対する手配者による手配結果

第3章 工事立会者手配問題の数理モデル

本章では、工事立会者手配問題を数理計画問題として定式化する。3.1節の数理モデルは、手配者に対するヒアリングを通して明らかになった制約や要望を全て盛り込んだものである。また、現実データに対して本節の数理モデルによって得られた結果の評価についても3.2節に述べる。

3.1 定式化

工事立会者手配問題では、立会者の集合 S および工事の集合 J 、工事 $k \in J$ から $l \in J$ への移動時間 d_{kl} 、立会者 $s \in S$ に工事 $k \in J$ を割り当てたときの割当ペナルティ c_{sk} 、工事 $k \in J$ の難易度 w_k 、および各立会者に割り当てられた工事の難易度の和に対する上限 W が与えられる。工事間の移動時間は、一方通行などの道路状況により工事 k から l のルートと l から k へのルートが異なる場合があり、このとき、 $d_{kl} \neq d_{lk}$ となる。また、同一工事 k 間の移動時間は $d_{kk} = 0$ とする。割当ペナルティの値 c_{sk} は大きいほど立会者 s の工事 k に対するスキルが不足していることを表し、難易度 w_k は大きいほど難しい工事であることを表す。

便宜上、工事の枠の集合を T とし、各立会者 s の t 番目の工事が k であることを、立会者 s の枠 t に工事 k を割り当てるという。また、立会者に枠数 $|T|$ 未満の工事を割り当てること、すなわち工事が割り当てられない枠があり得ることを表すため、ダミー工事を用意する。その際、ダミーを経由しても正しい移動時間が得られるよう、工事の集合 J の各要素 k に対応するダミー k' を用意してそれら全ての集合を J' とし、ダミーも含めた移動時間 d_{kl} を以下のように定義する (工事 k に対応するダミー

を k' と記す):

$$d_{kl'} = \begin{cases} 0, & \text{if } l' = k' \\ \infty, & \text{if } l' \neq k' \end{cases} \quad (k \in J, l' \in J')$$

$$d_{k'l'} = \begin{cases} 0, & \text{if } l' = k' \\ \infty, & \text{if } l' \neq k' \end{cases} \quad (k' \in J', l' \in J')$$

$$d_{k'l} = d_{kl} \quad (k' \in J', l \in J).$$

工事立会者手配問題は、各工事にちょうど1人の立会者を割り当てる問題であり、その際各立会者に割り当てられる工事の総難易度は W 以下でなければならない。このとき全ての立会者の総移動時間と総割当ペナルティの重み付き和を最小化することが目的である。立会者 s の枠 t に工事 k を割り当てるとき $x_{skt} = 1$ 、そうでないとき $x_{skt} = 0$ となる決定変数 x_{skt} を用いると、工事立会者手配問題は、

$$\text{minimize} \quad \sum_{s \in S} D_s + \alpha \sum_{t \in T} \sum_{k \in J} \sum_{s \in S} c_{sk} x_{skt} \quad (3.1.1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{k \in J \cup J'} x_{skt} = 1, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (3.1.2)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} x_{skt} = 1, \quad \forall k \in J \quad (3.1.3)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in J} w_k x_{skt} \leq W, \quad \forall s \in S \quad (3.1.4)$$

$$D_s = \sum_{t \in T} \sum_{k, l \in J \cup J'} d_{kl} x_{skt} x_{sl(t+1)}, \quad \forall s \in S \quad (3.1.5)$$

$$x_{skt} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, \forall k \in J \cup J', \forall t \in T \quad (3.1.6)$$

と定式化できる。目的関数 (3.1.1) は総移動時間と総割当ペナルティの重み付き和の最小化を表す ($\alpha (\geq 0)$ はパラメータ)。制約 (3.1.2) は各立会者 s がどの枠 t にも工事またはダミーを割り当てられることを、制約 (3.1.3) は各工事 k がちょうど1人の立会者に割り当てられることを、制約 (3.1.4) は各立会者 s に割り当てられる工事の総難易度が W 以下となることを表す。(3.1.5) 式は各立会者 s の移動時間を表すが、この式の中では便宜上枠 $|T| + 1$ を枠1とみなす。

数理モデル (3.1.1)–(3.1.6) に対する解が有限の目的関数値を持つとき、(3.1.5) 式によって計算される移動時間は、立会者 s に割り当てられた工事のうちダミーでないもののみの間を一周するのに要する時間になることが容易に示せる。

3.2 結果に対する評価

第2章の最後に紹介した実データに対応する問題例に対する、3.1節の数理モデルの計算結果を述べる。その問題例のパラメータは、工事数 $|J| = 36$ ，立会者数 $|S| = 14$ ，枠数 $|T| = 3$ ，総難易度の上限 $W = 8$ ，割当ペナルティ $c_{sk} \in \{1, \dots, 10\}$ ，難易度 $w_k \in \{1, 2, 3\}$ である。

この数理モデルに対する解の導出には、汎用ソルバーを用いた。よく知られている汎用ソルバーには、NUOPT (数理システム)[19]，Gurobi Optimizer (Gurobi Optimizer)[20]，IBM ILOG CPLEX (IBM)[21] 等があるが、本節では、非線形アルゴリズムやその他多様なアルゴリズムが内蔵されている NUOPT (数理システム) を用いた。また、 α の値によっては1週間以上時間をかけても厳密な最適解が得られないことがあったため、計算時間を60秒で打ち切り、得られる最良解を出力した。

全ての立会者の総移動時間と総割当ペナルティのスケールを考慮し、 α を0から2,000まで10ずつ変更した。その結果、12個の相異なる解を得た。それらの解について現場の手配者と議論を行った結果、図3.1に示す、 $\alpha = 50$ のときの数理モデルにより得られた解は、現場の手配結果として概ね実用的であるという意見を得ることができた。この結果は、手配者の手配結果(図2.1)と工事のグループ分けが類似しており、全ての立会者の総移動時間も手配者の手配結果より1%程度多いもののほぼ同等である。総割当ペナルティについては、手配者の手配結果の約半分となっている。また、他の α に対して得られた解も、その多くが軽微な修正を加えることで実用的な解として利用できることがわかった。以上より、本数理モデルの実社会においての一定の実用性を確認できた。

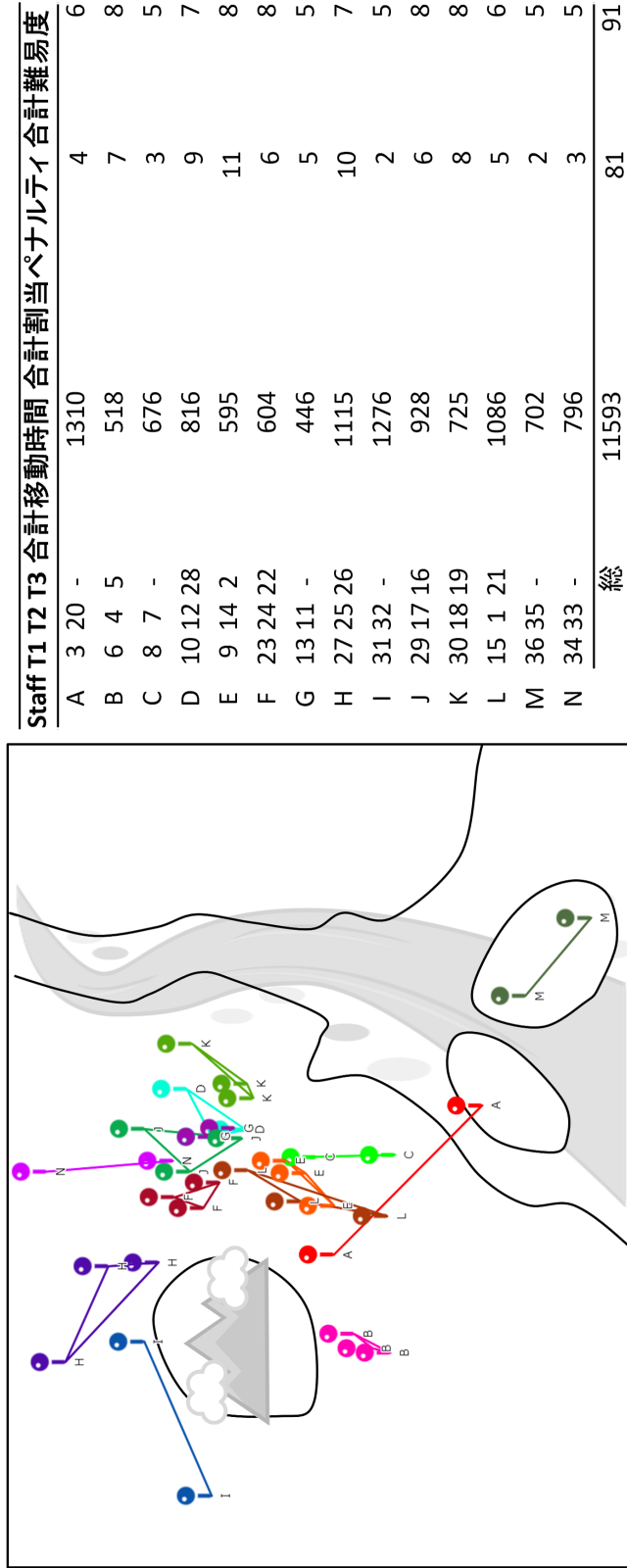


図 3.1: 工事立会者手配問題に対する数理モデルによる手配結果 ($\alpha = 50$)

第4章 数理モデルの比較と検証

第3章で述べた工事立会者手配問題に対する数理モデルは、現場の手配者へのヒアリング結果を数理モデルに反映し、得られた解を現場の手配者に評価してもらうことを反復することで得られた。その反復の過程で数理モデルを修正したが、数理モデルから得られた解の評価は現場の手配者による主観的な評価に基づいていた。本章では、数理モデルに対する手配者の評価結果と相関のある客観的な指標について検証する。その候補として、現場の手配者による手配結果と数理モデルで得られる結果がどの程度近いかに注目する。手配結果の間のそのような距離の測り方には自由度があるため、測り方による傾向の違いについても検証する。

そのために、まず、4.1節で現場の手配者にヒアリングを実施し、試行錯誤を繰り返しながら数理モデルの構築および改善を行った過程で試みた数理モデルについて説明する。具体的には第3章の数理モデルの構築に至る過程で得られた3つの数理モデルについて説明する。次に、4.2節で数理モデル1から数理モデル3および第3章の数理モデルから得られる解を、2種の目的関数の値に基づいて比較する。最後に、4.3節で解同士の相違度を2種定義し、それらとそれらの重み付き和を用いて、手配者がコメントした点を改善するように数理モデルを修正するに従い、算出される解と手配者が手作業で作成した手配結果との相違度がどのように変化するかを検証する。

4.1 検証に用いる数理モデルと得られる解について

本節では、数理モデルの修正を行う過程で手配者に提示した3つの数理モデルと最終的に得られた第3章の数理モデルに対して得られる解を比較に用いる。まず、3つの数理モデルとその解に対する手配者のコメントについて述べる。

数理モデル1.

1つ目の数理モデルとして、立会者が事務所を出発して担当する工事を全て巡回した後事務所に戻る総移動時間を最小化するモデルを検討した。これを数理モデル1と呼ぶ。第3章の数理モデルとの相違点は、目的関数(3.1.1)には含まれない事務所

と工事現場の行き来の移動時間を含んでいることと、総割当ペナルティを考慮していないこと、および工事の難易度に関する制約(3.1.4)がないことである。本数理モデルは、各工事を配送先(顧客)、各立会者を運搬車、事務所をデポとみなし、各顧客の需要量を1、運搬車の積載量上限を立会者が巡回できる工事数の上限に設定すると、配送計画問題[22, 23]に帰着できる。本数理モデルに対する解の導出に限り、配送計画問題に対する代表的な解法の一つである文献[24]のアルゴリズムを用いた。数理モデル1から得られる解を図4.1に示す。図4.1を手配者に提示した結果、工事のグループ分けに不自然な点があることに手配者が気づき、その原因として総移動時間の測り方が彼らが想定しているものと異なることが挙げられる旨の指摘があった。

Staff	T1	T2	T3	合計移動時間	合計割当ペナルティ	合計難易度
A	19	28	29	681	15	6
B	35	36	20	1511	19	8
C	9	7	8	886	8	8
D	13	10	17	594	7	7
E	21	-	-	0	6	2
F	11	12	15	720	16	8
G	18	30	14	675	17	8
H	23	22	24	608	14	8
I	4	5	6	518	20	8
J	34	25	26	1273	14	7
K	31	27	32	2041	21	7
L	2	-	-	0	7	3
M	3	-	-	0	1	3
N	16	33	1	1030	18	8
総				10537	183	91

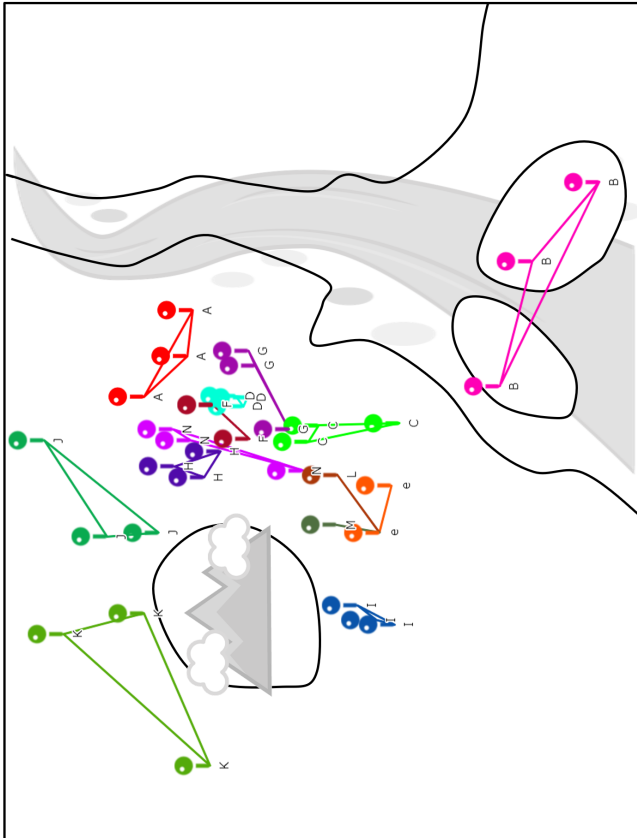


図 4.1: 工事立会者手配問題に対する数理モデル 1 による手配結果

数理モデル 2.

数理モデル 1 の解に対する手配者からのコメントを受け、総移動時間に事務所と工事現場の間の時間を含まないように目的関数を修正したモデルを考えた。これを数理モデル 2 と呼ぶ。第 3 章の数理モデルとの相違点は、目的関数 (3.1.1) に割当ペナルティがないことと、工事の難易度に関する制約 (3.1.4) がいないことである。また、数理モデル 3 から得られる解を図 4.2 に示す。図 4.2 を手配者に提示した結果、工事に対して立会者が必要なスキルを有していない場合があることに気づき、総移動時間だけではなく、各立会者が各工事に対して所有しているスキルを考慮したほうがよいとの指摘があった。

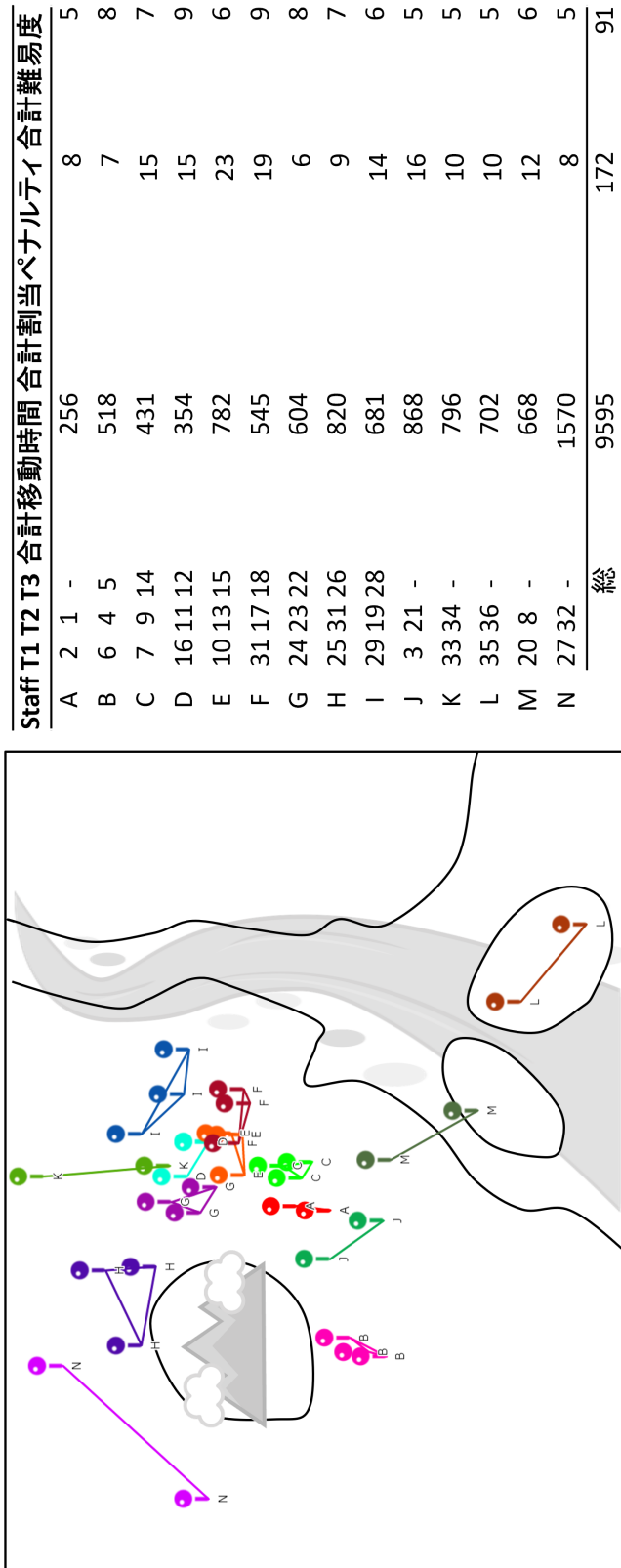


図 4.2: 工事立会者手配問題に対する数理モデル2による手配結果

数理モデル 3.

数理モデル2の解に対して手配者より、立会者のスキルと工事の組合せに対する考慮が必要である旨コメントがあった。これを受け、工事と立会者の間の割当ペナルティ、すなわち(3.1.1)式の第2項を導入したモデルを考えた。これを数理モデル3と呼ぶ。第3章の数理モデルとの相違点は、工事の難易度に関する制約(3.1.4)がないことである。数理モデル3から得られる解を図4.3と図4.4に示す。図4.3は重み $\alpha = 40$ として総移動時間を優先して得られた解であり、図4.4は重み $\alpha = 190$ として総割当ペナルティを優先して得られた解である。図4.3と4.4を手配者に提示した結果、1人の立会者に難易度の高い工事が集中している場合があることに気づき、各立会者に割り当てられた工事の難易度の合計が一定値を超過しないよう考慮したほうがよいとの指摘があった。

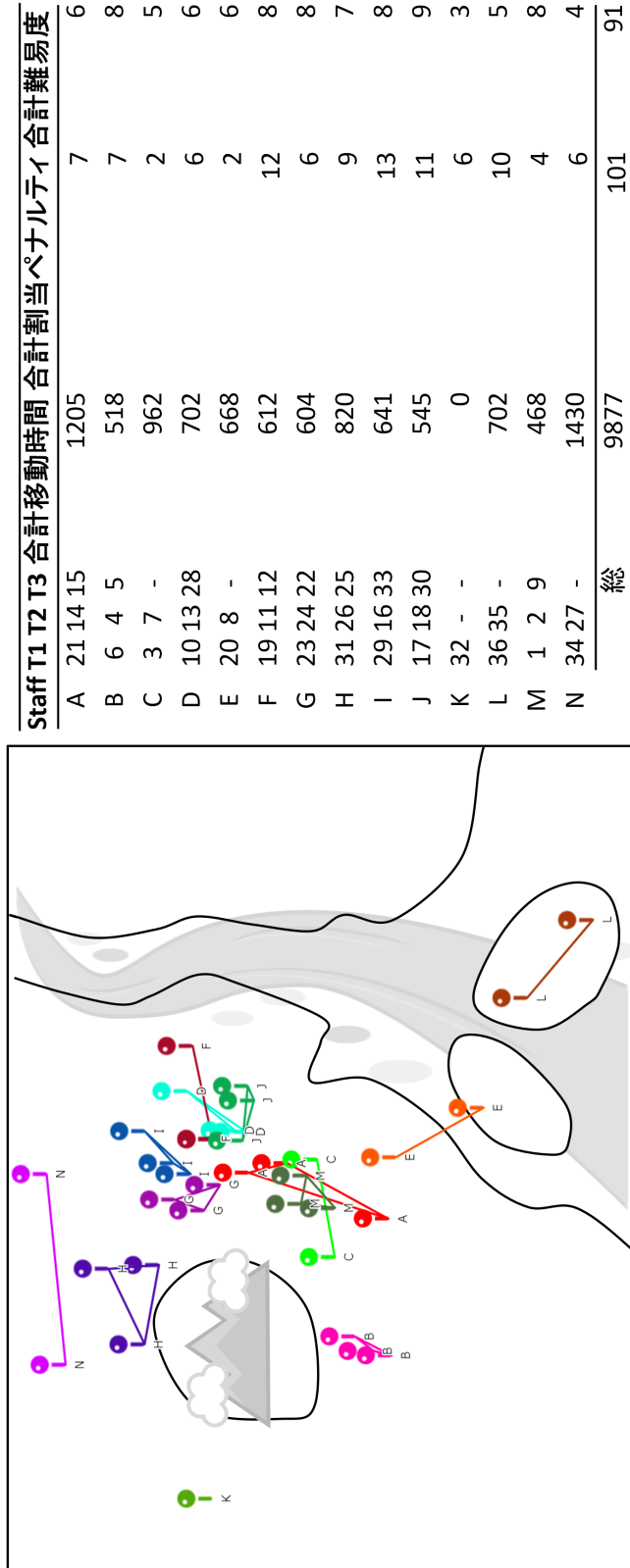


図 4.3: 工事立会者手配問題に対する数理モデル 3 による手配結果 ($\alpha = 40$)

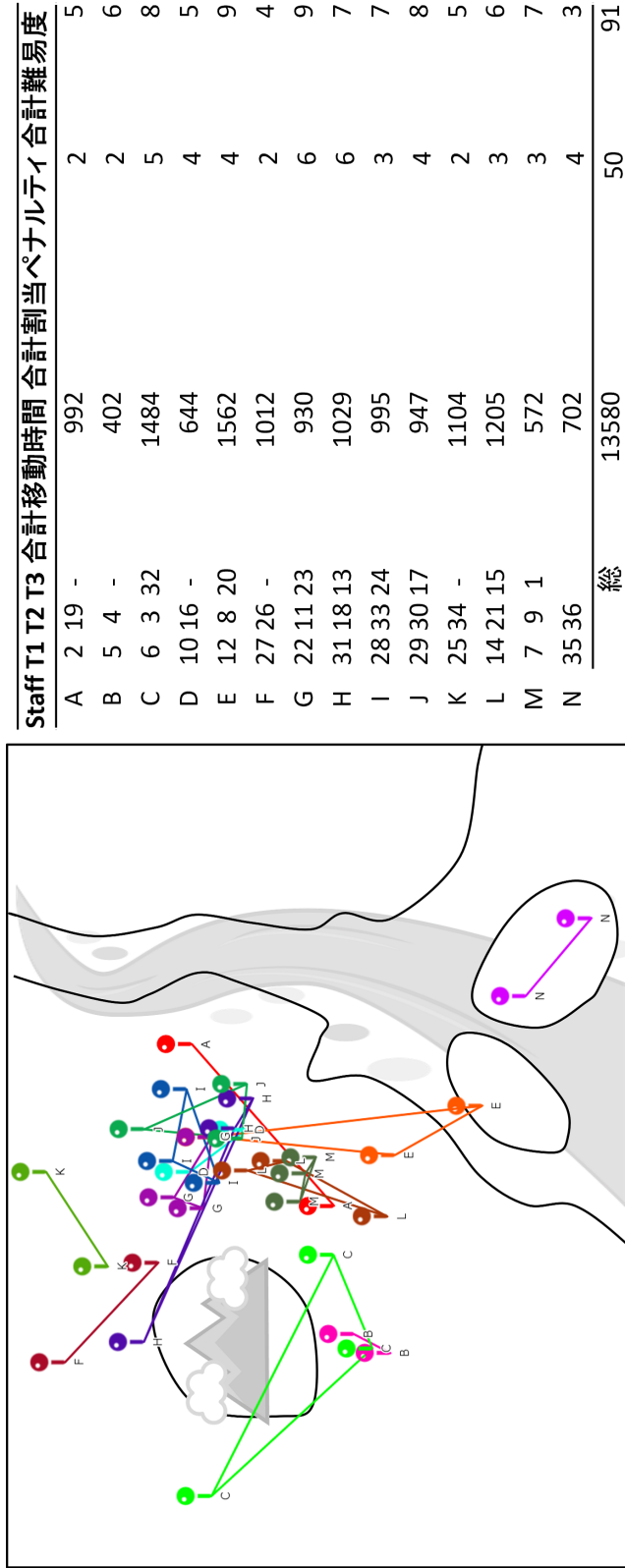


図 4.4: 工事立会者手配問題に対する数理モデル3による手配結果 ($\alpha = 190$)

4.2 目的関数による手配結果の比較

現場の手配者の手配結果と第4.1章の3つの数理モデルおよび第3章の数理モデル(便宜上, 以下では数理モデル4と呼ぶ)に対して得られる解を, 総移動時間と総割当ペナルティに関する散布図を用いて図4.5に示す. 総移動時間と総割当ペナルティの値はともに小さいほどよい結果となる. 図中の点は, 現場の手配者の結果, 数理モデル1と2の結果, および数理モデル3と4において α の値を0, 10, 20, ..., 2000として得られた各モデルにつき201個の解のうち相異なるものすべての結果である. 数理モデル3と4については, 具体的には, 数理モデル3において目的関数内の重み $\alpha \in \{20, 40, 60, 170, 190, 330, 610, 770, 1390\}$ を与えたときの結果, および数理モデル4において重み $\alpha \in \{0, 10, 30, 50, 60, 110, 200, 280, 360, 640, 970\}$ を与えたときの手配結果に対応する. 便宜上これら24個の手配結果に通し番号をつけ, 項番1, 項番2, ..., 項番24と呼ぶ. 図4.5より現場の手配者の結果は総移動時間が小さく, 総割当ペナルティが大きい位置にあるため, 総移動時間を優先した割当結果であることがわかる. 項番1の現場の手配者の結果に対して散布図上のユークリッド距離が最も小さい項番13の数理モデル4($\alpha = 0$)による手配結果が, 手配者が望む結果に最も近いであろうと直感的には思われる. しかしながら, 現場の手配者にヒアリングしたところ, 現場の手配者が最も高く評価した結果は項番16の数理モデル4($\alpha = 50$)の解であった. そのため, 散布図上の点間のユークリッド距離とは異なる別の尺度で手配結果同士の距離を測る必要があると思われる. そのような尺度として, 次節では手配結果そのものの乖離の度合い, すなわち相違度を測るいくつかの指標を考える.

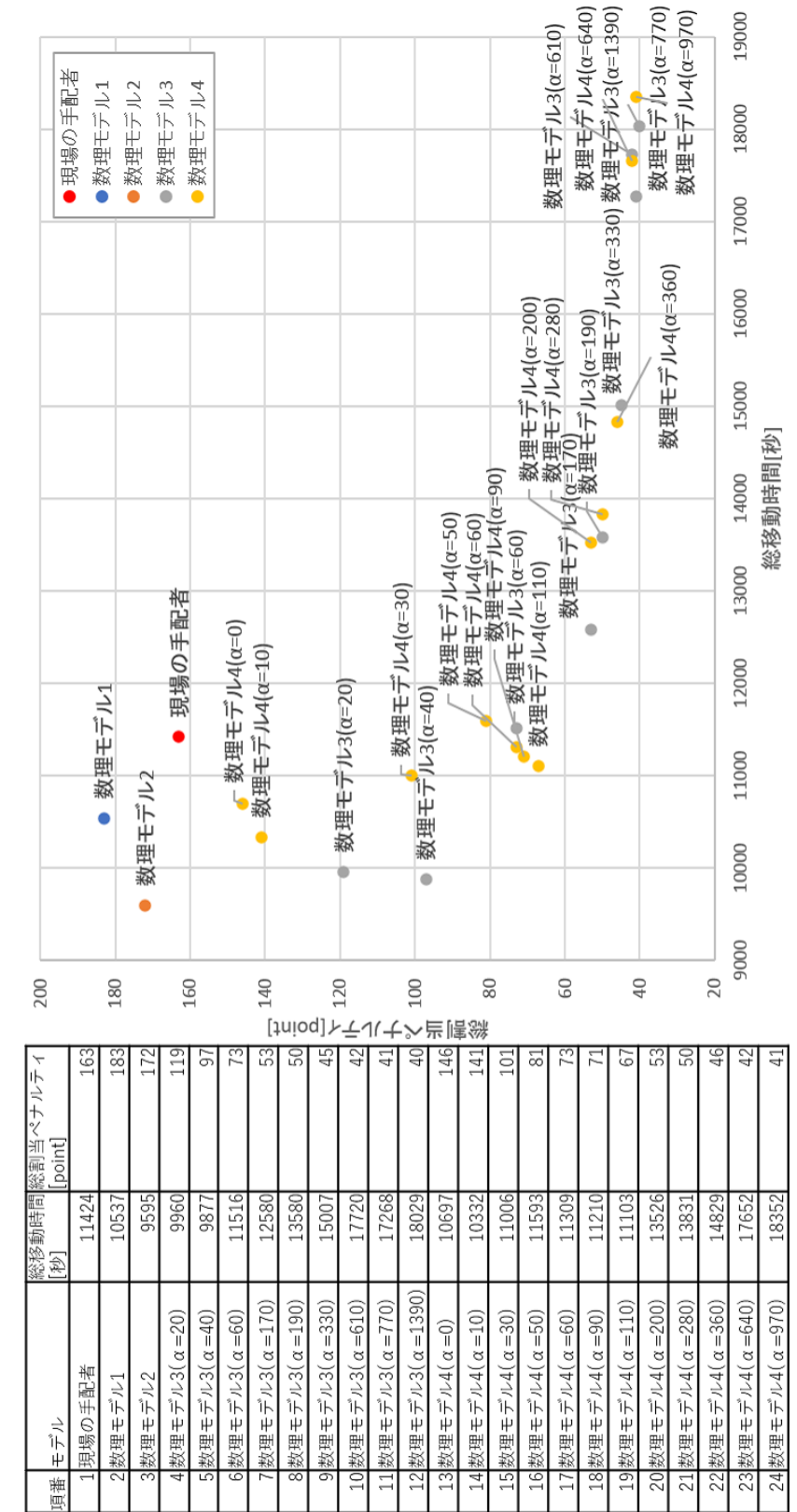


図 4.5: 数理モデルと項番の対応および総移動時間と総割当パネル数の散布図

4.3 手配結果の相違度について

工事立会者手配問題は、各立会者にいずれの工事を割り当て、各立会者が自分に割り当てられた工事をどういう順序で巡回するかを決定する問題であり、解の基本構造である工事間の移動ルートと各工事への立会者の割当は、それぞれが目的関数に直接寄与している。また、2節で述べた現状の手順において手配者が工事手配の決定を行う際、工事集合をグループに分割し、その後、各グループをいずれかの立会者に割当を行っていることから、解の相違度を測る観点として、工事間の移動ルートと、各工事への立会者の割当の2つを考える。工事間の移動ルートに関する解の相違度は、手配者が地図上に記された点のグループ分けをどの程度重視して割当を行っているかを測り、各工事への立会者の割当に関する解の相違度は、各工事に対する立会者のスキルをどの程度重視して割当を行っているかを測ることを目的としている。

以下では、これらの2つの観点で解の間の相違度を測る指標を検討する。これらの2つの観点で解の間の相違度を測ることによって、数理モデルの改善を行う際に、手配者がいずれの指標を重視しているのかを観測することを目的とする。2章で述べた手配者が工事手配の決定を行う工程から、手配者は地図上の視覚的な情報を重視してまずグループ分けを実施し、後から各グループをいずれかの立会者に割当を行っているため、各工事への立会者の割当より工事間の移動ルートの観点を重視していることが予想される。また、2種の相違度の重み付き和によって、数理モデルの解に対する手配者の評価がよくなるにつれて改善する数値的な指標を作ることができないかを検証する。

4.3.1 工事間の移動ルートに関する解の相違度

本節では、工事間の移動ルートのみ注目した2つの解の相違度を定義する。工事間の移動ルートにおいて隣り合う工事の対をルートの辺と呼ぶ。このような辺集合に注目して順序づけ問題の解の相違度や類似度を測る考え方は、たとえば巡回セールスマン問題に対する Lin と Kernighan の論文で複数の巡回路の類似度を表すのに用いられている [25]。本研究が対象とする問題例では、工事間の移動時間は対称 (すなわち任意の k と l に対して $d_{kl} = d_{lk}$) であるため、辺の向きを考えず、無向辺とみなす。例えば、工事1-工事2-工事3と工事1-工事3-工事2では、周る順序は逆であるが、同じルートとみなし、いずれも辺集合 $\{\{1, 2\}, \{2, 3\}, \{3, 1\}\}$ で表す。簡単のため、多重辺や自己ループを考えない。すなわち、ある立会者に割り当てられた工

事数が2つのときには、その人のルートの辺の数は1つとなり、工事数が1つのときには、辺の数は0となる。

以下では、二つの手配結果に対して、それらの間のルートに関する相違度を定義する。また、 N 個の手配結果 X_1, X_2, \dots, X_N に対し、 X_u と X_v の間のルートの相違度を (u, v) -成分とする行列を相違度行列 H_A と定義し、その (u, v) -成分を h_{uv}^A と記す。各手配結果 X_u に対し、工事の集合 J を頂点集合、全立会者のルートの辺 (すなわちルートにおいて隣り合う工事の対) 全ての集合 E_u を辺集合とする単純無向グラフを $G_u = (J, E_u)$ と記す。そして、 X_u と X_v の間のルートに関する相違度を、 E_u と E_v の対称差の要素数を2で割った値 $h_{uv}^A = |(E_u \setminus E_v) \cup (E_v \setminus E_u)|/2$ と定義する。

さらに、次節で述べる割当に関する相違度とスケールを合わせるため、 H_A の各成分の値を0から100の範囲に正規化した行列を \hat{H}_A とする。具体的には、 \hat{H}_A の (u, v) -成分 \hat{h}_{uv}^A を、取りうる値の最大値 $|J|$ で h_{uv}^A を割った値に100をかけたもの、すなわち $\hat{h}_{uv}^A = 100h_{uv}^A/|J|$ とする。

4.3.2 工事の立会者への割当に関する解の相違度

本節では、各工事がどの立会者に割り当てられているかという観点で2つの解の相違度を定義する。具体的には、2つの解の間で、割り当てられた担当者が異なる工事の数を、割当に関する相違度とする。このような割当先の違いに注目して解の相違度や類似度を測る考え方は広く知られており、例えば最大充足可能性問題や一般化割当問題に対して解同士の相違度とコストの相関を調べた研究もある [26]。

各手配結果 X_u に対し、各工事 k に立会者 s が割り当てられていることを $B_u(k) = s$ と記す。そして、 X_u と X_v の間の割当の相違度 h_{uv}^B を B_u と B_v のハミング距離 $h_{uv}^B = |\{k \in J \mid B_u(k) \neq B_v(k)\}|$ とする。また、 h_{uv}^B を (u, v) -成分とする行列を、類似度行列 H_B と定義する。さらに、 \hat{H}_B の各成分の値を0から100の範囲に正規化した行列を \hat{H}_B とする。具体的には、 \hat{H}_B の (u, v) -成分 \hat{h}_{uv}^B を、取り得る値の最大値 $|J|$ で h_{uv}^B を割った値に100をかけたもの、すなわち $\hat{h}_{uv}^B = 100h_{uv}^B/|J|$ とする。

4.3.3 解の相違度の重み付き和

移動ルートおよび割当に関する相違度行列 \hat{H}_A と \hat{H}_B の重み付き和を

$$\hat{H}_C = (1 - \beta)\hat{H}_A + \beta\hat{H}_B \quad (4.3.1)$$

と記す. β ($0 \leq \beta \leq 1$) は \hat{H}_A と \hat{H}_B のどちらをどの程度重視するかを表すパラメータである.

4.3.4 現実の工事データに対する手配結果の比較

4.2 節で述べた実際の工事データに対する 24 個の手配結果を, 相違度の尺度を用いて比較する.

まず, 工事間の移動ルートに関する相違度行列 \hat{H}_A を図 4.6 に示す. 図 4.5 の 1 行目が現場の手配者による手配結果と, 4.2 節で述べた数理モデル 1 から 4 を解いて得られる解との相違度である. 現場の手配者による手配結果との相違度が最も小さいのは項番 16 と 18 の数理モデル 4 ($\alpha = 50$) と ($\alpha = 90$) であったが, このうち前者は, 現場の手配者が最も良いと評価した結果である. また, 項番 3 の数理モデル 2, および数理モデル 3 と 4 の α が比較的小さいもの (項番 4 から 6, および項番 13 から 19) によって得られる解同士の相違度が比較的近い傾向にあり, 一方これらと数理モデル 3 と 4 の α の値の大きいもの (項番 7 から 12, および項番 20 から 24) との間の相違度は大きい傾向にあった. すなわち移動時間を割当ペナルティよりも重視するか否かによって得られるルートの傾向が変わることが観測できた.

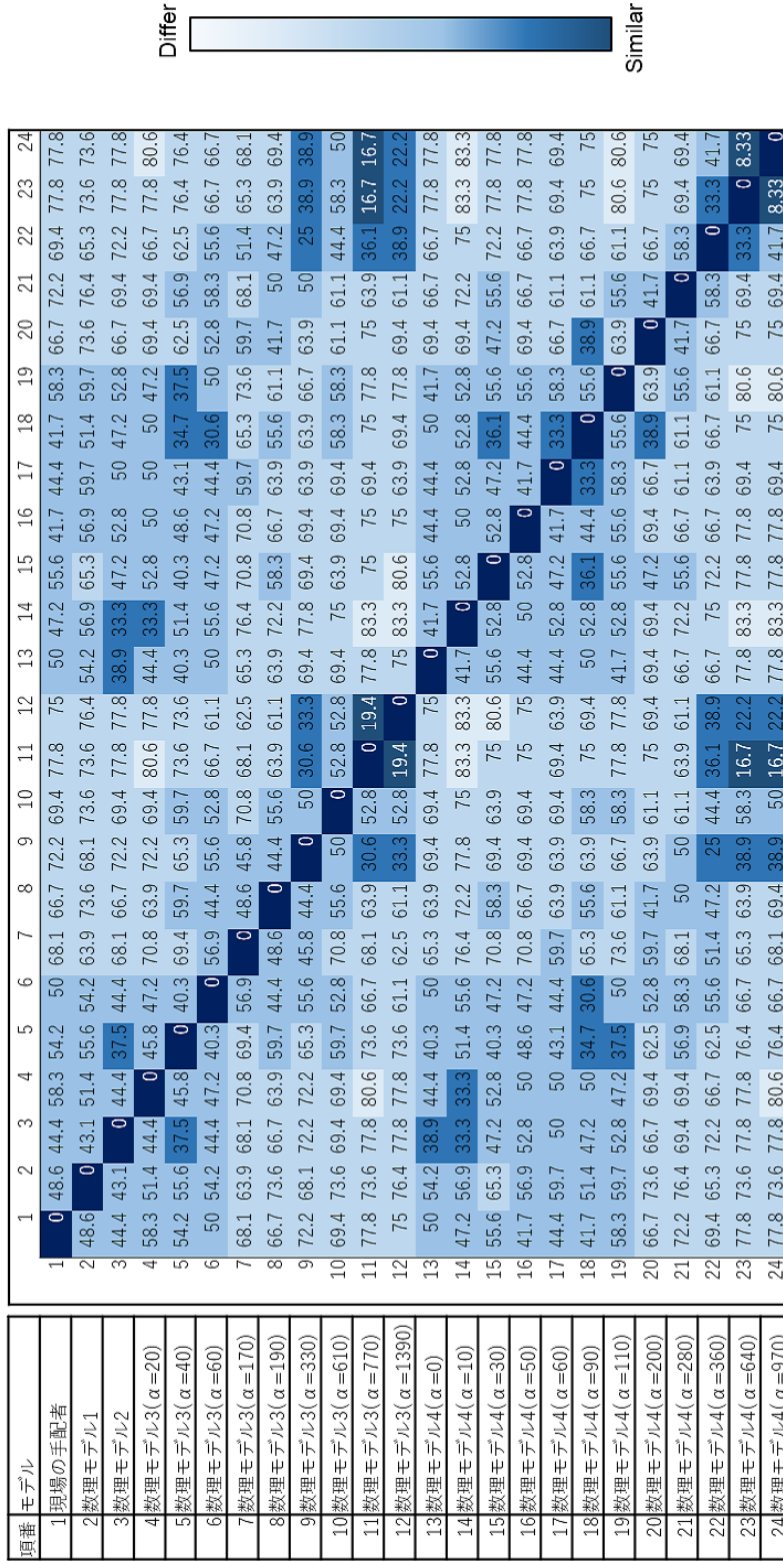


図 4.6: 解の相違度行列 \hat{H}_A

次に、割当に関する相違度行列 \hat{H}_B を図 4.7 に示す。図 4.7 の 1 行目が現場の手配者による手配結果と、4.2 節で述べた数理モデル 1 から 4 によって得られる解との相違度である。 \hat{H}_B の各要素の値は \hat{H}_A と比較して大きく、いずれのモデルによる解も手配者による手配結果との相違度は大きい。また、割当ペナルティを考慮しない数理モデル 1 と 2 (項番 2 と 3) との相違度の最小値が 91.7, それを考慮する数理モデル 3 と 4 (項番 4 以降) との相違度の最小値が 86.1 と、ほとんど差がないことから、手配者による手配結果では、割当ペナルティがあまり考慮されていないといえる。この結果は 4.1 節で述べた数理モデル 2 に対する手配者からのコメントと矛盾する。そこで改めて現場の手配者に確認した結果、第 2 章で述べた人手による工事手配の手順において、立会者の割当を工事グループを決定した後に行っているため、割当ペナルティの考慮が十分にできなかったことがわかった。数理モデルによる解を比べると、数理モデル 3 と 4 の中の α の大きいもの同士、すなわち割当ペナルティを重視するモデルによる解同士は、比較的相違度が小さい傾向にあることが観測できた。

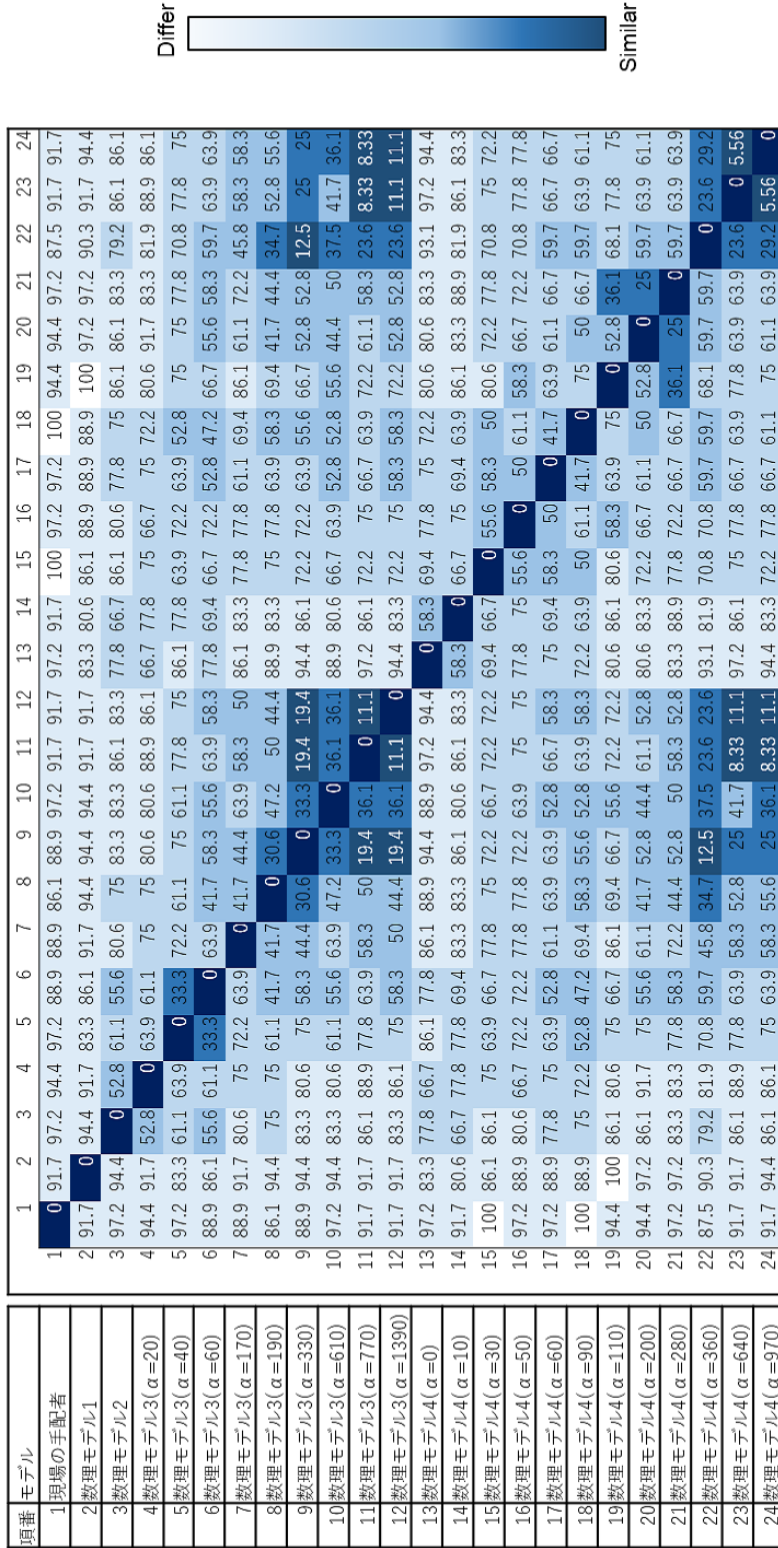


図 4.7: 解の相違度行列 \hat{H}_B

最後に、2種の相違度の重み付き和 \hat{H}_C に基づいて手配結果を比較する。(4.3.1) 式の重み係数 β を小さめの値 (たとえば 0.1) に設定すれば、手配者が最も良いと評価した項番 16 の数理モデル 4 ($\alpha = 50$) の解と、手配者による手配結果との相違度が最小になるが、以下ではさらに、数理モデル 1 から数理モデル 4 に改善していくにつれて現場の手配者の手配結果との相違度が小さくなる重み係数 β を求めることを考える。手配者の評価には主観が入り、評価がよくなるにつれて改善する数値的な指標を作ることは一般には容易ではないが、そのような β が存在すれば、特定の事例に対する限定的な指標ではあるものの、 \hat{H}_C の相違度が、そのような評価指標の一つとなることを意味する。そこで、以下ではそのような β が存在するか否かを確認するため、そのような β を求めるための数理モデルを定義する。

便宜上、数理モデル i ($i = 1, 2, 3, 4$) の手配結果の項番の集合を N_i とする。具体的には、 $N_1 = \{2\}$, $N_2 = \{3\}$, $N_3 = \{4, 5, \dots, 12\}$, $N_4 = \{13, 14, \dots, 24\}$ である。現場の手配者による手配結果 (項番 1) と数理モデル i との相違度の最小値を $e_i(\beta)$ と記す。すなわち、 \hat{H}_C の (u, v) -成分を \hat{h}_{uv}^C と記すと、 $e_i(\beta) = \min_{u \in N_i} \hat{h}_{1u}^C$ である。なお、 $e_1(\beta)$ と $e_2(\beta)$ は β に対する線形関数、 $e_3(\beta)$ と $e_4(\beta)$ は上に凸な区分線形関数となる。

数理モデルを改善するに従い、現場の手配者による手配結果と各数理モデルによる解との相違度が小さくなるという条件は、 $e_1(\beta) > e_2(\beta) > e_3(\beta) > e_4(\beta)$ と書けるが、これらの間の差がいずれも大きくなるよう、その最小値 $\min_{i \in \{1, 2, 3\}} (e_i(\beta) - e_{i+1}(\beta))$ を最大にする β を求める。そのような β を求める問題は以下のように定式化できる:

$$\text{maximize} \quad \delta \quad (4.3.2)$$

$$\text{subject to} \quad \delta \leq e_i(\beta) - e_{i+1}(\beta), \quad i = \{1, 2, 3\} \quad (4.3.3)$$

$$\beta \geq 0. \quad (4.3.4)$$

数理モデル (4.3.2)–(4.3.4) に $\delta > 0$ を満たす解が存在すれば、その解における β を用いた時、手配者の手配結果と各数理モデルから得られる手配結果との相違度は、数理モデルを改良するごとに小さくなる。数理モデル (4.3.2)–(4.3.4) を解いてみたところ、そのような解が存在することがわかった。また、そのような解が存在する β の範囲は $0.4010 \leq \beta \leq 0.4208$ であった。すなわち、 β をこの範囲のいずれかの値に設定すれば、数理モデルを変更して得られる解に対する手配者の評価が上がるにつれて相違度は小さくなる。また、最適解は $\beta = 0.4208$ であり、このとき数理モデル間の相違度の差の最小値 δ が最大となって、手配者の評価がより大きく相違度に表れる。 $\beta = 0.4208$ のときの相違度行列 \hat{H}_C を図 4.8 に示す。 $e_3(\beta)$ と $e_4(\beta)$ を実現する項番はそれぞれ 6 と 16 であり、 $e_1(\beta), \dots, e_4(\beta)$ の値は 66.7, 66.7, 66.4, 65 と減少し

ている。また、現場の手配者が最も良いと評価した項番16の数理モデル4 ($\alpha = 50$) が $e_4(\beta)$ を実現している、すなわち手配者による手配結果との相違度が最も小さい解であることが確認できる。

このような重み係数 β に基づく相違度の実用的な利用法の可能性として、例えば、数理モデルあるいは数理モデル内のパラメータを改善したいときに、この指標をより良くする解が得られるように数理モデルあるいはパラメータを修正することが挙げられる。その結果、毎回手配者にインタビューすることなく、より満足してもらえる解が得られるようになる可能性を上述の結果は示唆している。

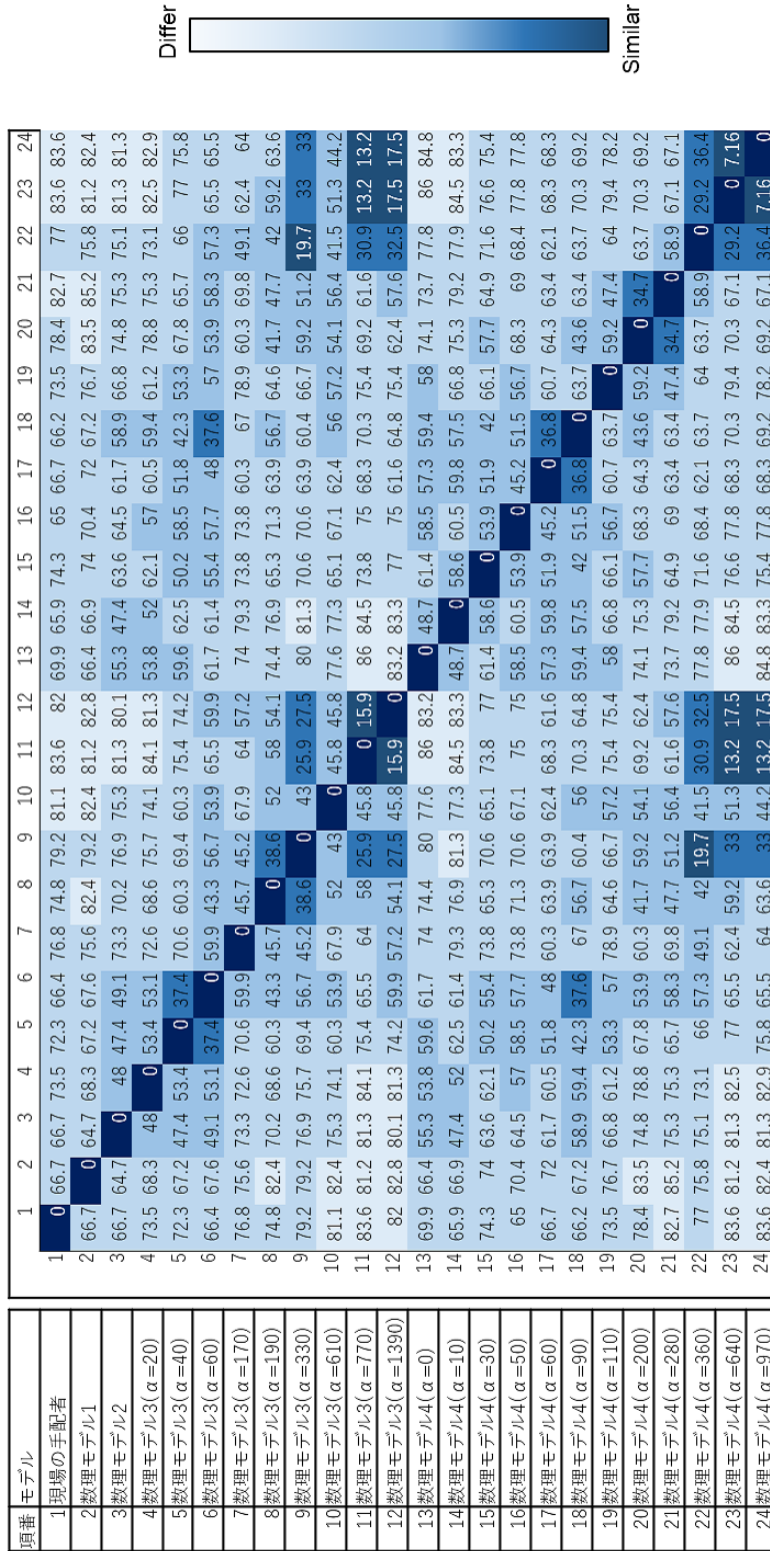


図 4.8: 解の相違度行列 \hat{H}_C ($\beta = 0.4208$)

第5章 工事立会者手配問題の種々の定式化に基づく求解法

ある問題を整数計画問題として定式化する際に，複数通りの定式化が可能であることがしばしばあり，最適化問題としては等価でも，汎用ソルバーを用いて求解するときの効率が定式化によって大きく異なることがある．また，定式化によっては汎用ソルバーを適用する際に工夫が必要な場合もある [27, 28, 29]．本章では，3.1 節で定義した工事立会者手配問題のいくつかの定式化と，それに基づく求解法について述べる．3.1 節の定式化に NUOPT を適用して得られた解は厳密な最適解とは限らない場合がある．そこで，3.1 節の定式化とは異なる定式化として，実行可能なルート候補の全列挙に基づく集合被覆アプローチによる定式化，制約生成法に基づく定式化，および実行可能なルート候補を削減した集合被覆アプローチによる定式化を考え，それらに対して汎用ソルバーを用いて求解する手法について述べる．また，第6章では，これらの比較検証を行う．

5.1 集合被覆アプローチによる定式化

集合被覆アプローチは，事前に実行可能なルートを全て列挙したのち，それらの中から実際に利用するものを選ぶ問題を集合被覆問題あるいはそれに類する問題として定式化して解くことで解を得る方法の総称である．本研究では，ルート生成の際，総難易度が W 以下となるルートのみを実行可能なルートとして候補に含める．また，列挙した各ルートの合計移動時間と合計割当ペナルティを計算しておく．そして，各工事が選択したルートの少なくとも一つに含まれる（すなわち被覆される）ように，列挙したルート候補の中から立会者の数 $|S|$ 以下のルートを選択する問題として定式化するのである．

5.1.1 定式化

実行可能なルートの集合を R とする. ルート $r \in R$ の合計移動時間を \tilde{d}_r , 立会者 $s \in S$ がルート $r \in R$ を担当したときの合計割当ペナルティを \tilde{c}_{rs} , ルート r が工事 $k \in J$ を含むとき $a_{kr} = 1$, 含まないとき $a_{kr} = 0$ とする. このとき, 立会者 $s \in S$ がルート r を担当するとき $y_{rs} = 1$, 担当しないとき $y_{rs} = 0$ となる決定変数 y_{rs} を用いて, 問題を以下のように定式化できる:

$$\text{minimize} \quad \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (\tilde{d}_r + \alpha \tilde{c}_{rs}) y_{rs} \quad (5.1.1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} a_{kr} y_{rs} \geq 1, \quad \forall k \in J \quad (5.1.2)$$

$$\sum_{r \in R} y_{rs} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad (5.1.3)$$

$$y_{rs} \in \{0, 1\}, \quad \forall r \in R, \forall s \in S. \quad (5.1.4)$$

この問題は一般化上界制約付き集合被覆問題と呼ばれる問題であり [18], 集合被覆問題 (5.1.1), (5.1.2), (5.1.4) に, 各立会者 s に対応するルートの中からただか一つしかルートを選択できないことを表す制約 (5.1.3) が加わっている.

5.2 制約生成法に基づく定式化

本節では, 巡回セールスマン問題に対する制約生成法を紹介したのち, 工事立会者手配問題に対する制約生成法に基づく解法について述べる.

5.2.1 巡回セールスマン問題に対する制約生成法

巡回セールスマン問題 (traveling salesman problem, TSP) に対して Dantzig らが提案した数理モデル [30] を紹介する. 巡回セールスマン問題は, 訪問すべき点集合 J と点 $k \in J$ から点 $l \in J$ への移動コスト d_{kl} が与えられたとき, 全ての点を一度ずつ訪問して出発地点に戻る巡回路の中で, 総移動コストが最小のものを求める問題である. 巡回路において点 k の直後に点 l を通るとき $x_{kl} = 1$, そうでないとき

$x_{kl} = 0$ となる決定変数 x_{kl} を用いて、TSP は

$$\text{minimize} \quad \sum_{k,l \in J} d_{kl} x_{kl} \quad (5.2.1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{l \in J} x_{kl} = 1, \quad \forall k \in J \quad (5.2.2)$$

$$\sum_{l \in J} x_{kl} = \sum_{l \in J} x_{lk}, \quad \forall k \in J \quad (5.2.3)$$

$$\sum_{k,l \in J'} x_{kl} \leq |J'| - 1, \quad \forall J' \subsetneq J, J' \neq \emptyset \quad (5.2.4)$$

$$x_{kl} \in \{0, 1\}, \quad \forall k, l \in J \quad (5.2.5)$$

と定式化できる。目的関数 (5.2.1) は総移動コストを最小化することを、制約 (5.2.2) と (5.2.3) は各点 k において、セールスマンが k 以外の点から枝上を移動して k に至り、 k から枝上を移動して k 以外の点へ移ることを表す。制約 (5.2.4) は部分巡回路、すなわち J の点の一部のみを巡回する閉路が存在してはならないことを表し、部分巡回路除去制約と呼ばれる。この制約は TSP や配送計画問題を解く際にしばしば用いられる [31, 32, 33]。制約 (5.2.4) は訪問すべき点数に対し、制約数が指数オーダーとなる [34]。そのため、制約 (5.2.4) を明示的に全て書き下すのは訪問すべき点数が大きい場合現実的でない。

そこで、制約 (5.2.4) について、全ての制約を満たす解空間を探索するのではなく、(5.2.2), (5.2.3), (5.2.5) 式および制約 (5.2.4) の一部を対象とする問題を解き、得られた解が満たしていない (5.2.4) の制約が存在すればそのようなものを追加したのち問題を解き直す操作を反復する方法がしばしば用いられる。そのような方法の各反復では、制約 (5.2.4) のうち現在対象としているものを満たす最適解 x' を得たのち、 x' が満たしていない (5.2.4) の制約が存在するかどうかを確認する。存在しない場合は解 x' を最適解として出力し、そうでない場合は制約 (5.2.4) の中で x' が満たしていない制約を生成して、明示的に考慮する制約の集合に追加する。解 x' に部分巡回路が存在しなくなるまで、この操作を繰り返す。このような制約の追加を逐次行う手法は制約生成法と呼ばれている [35]。

5.2.2 工事立会者手配問題への適用

本節では、工事立会者手配問題に対して、制約生成法に基づく解法について述べる。

問題入力の記号 $(J, S, d, c, w, \nu, W, \alpha)$ は 5.1.1 節と同じである。立会者 $s \in S$ が工事 k の次に l を訪れるとき $x_{skl} = 1$ 、そうでないとき $x_{skl} = 0$ となる決定変数 x_{skl}

を用いて，工事立会者手配問題は

$$\text{minimize} \quad \sum_{s \in S} \sum_{k, l \in J} (d_{kl} + \alpha c_{sk}) x_{skl} \quad (5.2.6)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{s \in S} \sum_{l \in J} x_{skl} = 1, \quad \forall k \in J \quad (5.2.7)$$

$$\sum_{l \in J} x_{skl} = \sum_{l \in J} x_{slk}, \quad \forall s \in S, k \in J \quad (5.2.8)$$

$$\sum_{k, l \in J} w_k x_{skl} \leq W, \quad \forall s \in S \quad (5.2.9)$$

$$\sum_{k, l \in J} x_{skl} \leq \nu, \quad \forall s \in S \quad (5.2.10)$$

$$\sum_{k, l \in J'} x_{skl} \leq |J'| - \sum_{k' \in J \setminus J'} x_{sk'l'}, \quad \forall s \in S, \forall J' \subsetneq J, J' \neq \emptyset, \forall l' \in J \setminus J' \quad (5.2.11)$$

$$x_{skl} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, \forall k, l \in J \quad (5.2.12)$$

と定式化できる．目的関数 (5.2.6) は総移動時間と総割当ペナルティの重み付き和の最小化を表す．制約 (5.2.7)–(5.2.8) は各工事 k がちょうど 1 人の立会者に割り当てられることを，制約 (5.2.9) は各立会者 s に割り当てられる工事の総難易度が W 以下となることを，制約 (5.2.10) は各立会者が訪問する工事数が ν 以下となることを，制約 (5.2.11) は各立会者のルートが 2 つ以上の部分巡回路に分かれてはならないことを表す．

工事立会者手配問題に対する制約生成法について述べる．集合 $T \subseteq S \times (2^J \setminus \{\emptyset, J\}) \times J$ を用いて，制約 (5.2.11) のうち， T に含まれる (s, J', l') に対するもののみを考慮する制約を

$$\sum_{k, l \in J'} x_{skl} \leq |J'| - \sum_{k' \in J \setminus J'} x_{sk'l'}, \quad \forall (s, J', l') \in T \quad (5.2.13)$$

と定義する．まず， $T \leftarrow \emptyset$ とし，問題 (5.2.6)–(5.2.10)，(5.2.12)，(5.2.13) を解き，最適解 x' を求める．得られた解 x' が制約 (5.2.11) を満たす否かを確認し，満たさない場合，すなわち，立会者のルートの中で 2 つ以上の部分巡回路に分かれているものが存在する場合は，そのような部分巡回路の各々（例えば 2 人の立会者のルートがそれぞれ 2 つおよび 3 つの部分巡回路に分かれていたら合計 5 つの部分巡回路のそれぞれ）に対して，それに含まれる工事の集合を J' として， $J \setminus J'$ に含まれる l' と S に含まれる立会者 s の全ての組合せに対して (s, J', l') を T に追加する，すなわち，各部

Algorithm 1 工事立会者手配問題に対する制約生成法

-
- 1: $T \leftarrow \emptyset$.
 - 2: **repeat**
 - 3: 問題 (5.2.6)–(5.2.10), (5.2.12), (5.2.13) を解き, 最適解 x' を求める.
 - 4: **if** 解 x' の中である立会者のルートが2つ以上の部分巡回路に分かれている
 then
 - 5: 1人のルートが2つ以上に分かれている立会者全員のそのような部分巡回
 路全てに対し, 部分巡回路の各々に含まれる工事の集合を J' として, $T \leftarrow$
 $T \cup \{(s, J', l') \mid s \in S, l' \in J \setminus J'\}$ とする.
 - 6: **end if**
 - 7: **until** x' は問題 (5.2.6)–(5.2.12) の実行可能解である.
-

分巡回路に含まれる工事の集合 J' に対して, $T \leftarrow T \cup \{(s, J', l') \mid s \in S, l' \in J \setminus J'\}$ としたのち, 問題 (5.2.6)–(5.2.10), (5.2.12), (5.2.13) を解き直す. 解 x' に部分巡回路が存在しなくなるまで, この操作を続ける. 工事立会者手配問題に対する制約生成法を Algorithm 1 に示す.

次に, 制約 (5.2.11) とは異なる2つの部分巡回路除去制約と Algorithm 1 中の5行目の動作が異なる制約追加方針について述べる.

1つめの部分巡回路除去制約は

$$\sum_{k, l \in J'} x_{skl} \leq |J'| - \sum_{k' \in J} x_{sk'l'}, \quad \forall s \in S, \forall J' \subsetneq J, J' \neq \emptyset, \forall l' \in J \setminus J' \quad (5.2.14)$$

である. 制約 (5.2.11) では, 右辺の第2項で, $J \setminus J'$ に含まれる k' に対する $x_{sk'l'}$ の総和をとっているのに対して, 制約 (5.2.14) では, J に含まれる k' に対する $x_{sk'l'}$ の総和をとっており, 制約 (5.2.11) より制約 (5.2.14) のほうが強い制約となる.

2つめの部分巡回路除去制約は

$$\sum_{k, l \in J'} x_{skl} \leq |J'| - \frac{1}{|J \setminus J'|} \sum_{k' \in J} \sum_{l' \in J \setminus J'} x_{sk'l'}, \quad \forall s \in S, \forall J' \subsetneq J, J' \neq \emptyset \quad (5.2.15)$$

である. 制約 (5.2.15) は制約 (5.2.14) の代理制約であり, s と J' の組合せの各々に対して (5.2.14) では $|J \setminus J'|$ 個の制約があるのに対し, (5.2.15) ではこれらが1本に集約されている.

Algorithm 1 の5行目に示した集合 T への要素の追加方法を制約追加方針1と呼び, 以下に示すものを制約追加方針2と呼ぶ. 制約追加方針2では, Algorithm 1 中

の5行目において、見つかった部分巡回路の各々に対して、それに含まれる工事の集合を J' 、それらの工事を担当する立会者を s' として、 $J \setminus J'$ に含まれる l' の各々に対して (s', J', l') を T に追加する、すなわち $T \leftarrow T \cup \{(s', J', l') \mid l' \in J \setminus J'\}$ とする。

本節で述べた3つの部分巡回路除去制約と2つの制約追加のいずれの組合せを選んでも、(上述の終了条件が満たされるまで探索を継続できれば) 制約生成法によって問題に対する厳密な最適解が得られるが、最適解あるいは良質の実行可能解が得られるまでに要する時間は変わりうる。6.2節ではこれらを計算実験によって比較する。

5.3 実行可能なルート候補を削減した集合被覆アプローチによる定式化

5.1.1節では、重複しないルートを全列挙する集合被覆アプローチを用いた定式化を述べた。このとき、各立会者に対して可能なルート数は、 $|J|$ 個の工事から k ($1 \leq k \leq \nu$) 個の工事を選ぶ $\binom{|J|}{k}$ 個の組合せの各々に対して $(k-1)!$ 通りのルートがあることから、最大 $\sum_{k=1}^{\nu} \binom{|J|}{k} (k-1)!$ となる。しかし、各立会者のルートを生成する際、 $|J|$ 個の工事から k ($1 \leq k \leq \nu$) 個の工事を選ぶ組合せの各々に対して、合計割当ペナルティはルートによらず一定であるため、選んだ k 個の工事に対する最短巡回路のみを候補として考慮すれば十分である。この最短巡回路を得るためには、巡回セールスマン問題を解けばよい。本研究では、各組合せに対する最短巡回路を求めることを目的に、3.1節で述べた制約生成法を用いる方法を採用した。このように、総難易度が W 以下となる工事の組合せの各々に対して、最短巡回路のみをルート候補とする高々 $\sum_{k=1}^{\nu} \binom{|J|}{k}$ 個のルートをルート集合 R として5.1.1節の定式化を用いる方法である。

第6章 計算実験

本章では、5章で述べた工事立会者手配問題の種々の定式化に基づく求解法に対する計算実験の方法とその結果を述べる。まず、6.1節で計算環境と問題例について述べる。次に、6.2節で、5.2節で紹介した制約生成法の比較結果を述べる。6.3節では、5.1節の集合被覆アプローチと、それに5.3節の手法を導入したものの比較結果を述べる。最後に、6.4節で、制約生成法と集合被覆アプローチの比較結果について述べ、第5章で述べた3つの定式化に基づく求解法の実践的な利用法について述べる。

6.1 計算環境と問題例

本章の全ての計算実験は、Intel Core i9-9900k CPU (3.60 GHz), 48 GB メモリを搭載した計算機上で行い、各手法の実装には、Python (ver. 3.6.5) と汎用ソルバーである Gurobi Optimizer (ver. 8.1) を用いた。制約生成法を実装する際には、Gurobi Optimizer の Lazy Constraints 機能を利用した。使用した問題例では、パラメータ W と α を $W = 9, 18$, $\alpha = 1$ と設定した。計算の制限時間は、3,600 秒とした。

本研究では、過去に現場の手配者が実際に割当を行った36件の工事と14人の立会者からなる実データをもとに計算実験で用いる問題例を生成した。これより規模が小さい問題例は実データの工事と立会者からランダムにいくつかを抽出したデータである。

6.2 制約生成法の計算結果

まず、5.2節で紹介した制約生成法の比較結果を表6.1と6.2に示す。表6.1は $W = 9$, 表6.2は $W = 18$ の問題例で、これら2つの表に用いた問題例は、 W の値以外は同じものである。“ $|J|$ ”は工事数を、“ $|S|$ ”は立会者数を、“ ν ”は各立会者数に割り当てられる工事数の上限を、“Opt”は最適値を、“CG p -(q)”は制約追加方針 p と部分巡回路除去制約 (q) を用いた制約生成法を、“ArrTime”は最適解または

最良解に初めて到達するまでに要した計算時間 (秒) を, “SolTime” は問題例が厳密に解けて探索が終了するまでに要した時間 (秒) を, “UB” は制限時間までに得られた最良の上界値 (すなわち最良解の目的関数値) を, “*” は制限時間内に得られた最良解が最適であったことを, “TL” は最適性の保証が得られる前に制限時間に達して計算が打ち切られたことを, “UNK” は本研究で検証したいずれの方法を用いても, 制限時間内に最適解が判明しなかったことを表す. 本節で実験の対象とする手法では最適性の保証が得られていない問題例に対しても “Opt” の表示があるのは, 本稿に含む本節以外の手法で厳密な最適解が得られたためであり, “ArrTime” の表示が整数であるのは, Gurobi Optimizer の分枝カット探索のログに小数部の表示がなく情報が得られないためである.

制約追加方針については, 制約追加方針 1 と制約追加方針 2 の間に大きな差は見られなかった. 部分巡回路除去制約については, (5.2.11) と (5.2.14) の間に大きな差は見られず, (5.2.15) に比べて (5.2.11) と (5.2.14) のほうが厳密な最適解を得られた問題例が多く, 厳密な最適解が得られない問題例に対しては, ほとんどの問題例で UB は Opt と同程度であったものの, (5.2.15) による UB が (5.2.11) と (5.2.14) に比べてかなり悪い問題例があった ($|J| = 36$, $\nu = 4$, $W = 9$). また, 表 6.1 より表 6.2 のほうが, 制限時間内に厳密な最適解を得られた問題例が多く, ArrTime が小さい問題例が多い.

表 6.1: 制約生成法における制約追加方針と部分巡回除去制約の比較 ($W = 9$)

J	S	ν	Opt	CG1-(5.2.11)			CG1-(5.2.14)			CG1-(5.2.15)			CG2-(5.2.11)			CG2-(5.2.14)			CG2-(5.2.15)		
				SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB
10	4	3	4,360	1.46	1	*4,360	0.78	0	*4,360	2.23	1	*4,360	1.26	0	*4,360	1.64	0	*4,360	3.07	2	*4,360
10	4	4	4,017	2.34	1	*4,017	2.74	1	*4,017	3.45	1	*4,017	4.05	2	*4,017	4.61	0	*4,017	6.06	5	*4,017
10	4	5	3,874	2.06	1	*3,874	2.15	1	*3,874	5.93	2	*3,874	2.37	0	*3,874	2.01	1	*3,874	4.40	4	*3,874
10	4	6	3,874	2.07	1	*3,874	2.41	1	*3,874	4.39	3	*3,874	2.30	1	*3,874	1.94	1	*3,874	4.06	3	*3,874
10	4	7	3,874	2.28	1	*3,874	3.25	2	*3,874	3.71	1	*3,874	3.85	2	*3,874	3.21	2	*3,874	2.69	1	*3,874
10	4	8	3,874	2.36	1	*3,874	2.00	1	*3,874	4.22	2	*3,874	2.59	1	*3,874	2.38	1	*3,874	5.15	3	*3,874
15	6	3	6,344	7.05	6	*6,344	8.39	7	*6,344	56.82	36	*6,344	47.85	13	*6,344	60.07	4	*6,344	72.39	19	*6,344
15	6	4	5,650	149.22	58	*5,650	137.97	11	*5,650	TL	212	*5,650	112.52	42	*5,650	127.61	62	*5,650	1,513.55	84	*5,650
15	6	5	5,647	288.93	242	*5,647	229.30	151	*5,647	TL	2,213	*5,647	170.09	102	*5,647	198.64	139	*5,647	1,817.67	1,367	*5,647
15	6	6	5,647	249.19	61	*5,647	247.23	196	*5,647	215.56	150	*5,647	373.98	107	*5,647	224.28	52	*5,647	TL	332	*5,647
15	6	7	5,647	213.04	87	*5,647	179.58	127	*5,647	2,742.94	587	*5,647	201.73	118	*5,647	273.77	159	*5,647	TL	1,022	*5,647
15	6	8	5,647	162.79	78	*5,647	166.06	105	*5,647	3,412.99	1,896	*5,647	325.90	237	*5,647	199.05	92	*5,647	TL	330	*5,647
18	7	3	7,363	103.16	13	*7,363	147.08	3	*7,363	630.98	41	*7,363	162.07	31	*7,363	132.21	10	*7,363	443.43	29	*7,363
18	7	4	6,889	TL	188	*6,889	TL	265	*6,889	TL	494	*6,889	TL	203	*6,889	TL	240	*6,889	TL	591	*6,889
18	7	5	6,741	TL	282	*6,741	TL	226	*6,741	TL	99	*6,741	TL	45	*6,741	TL	1,941	*6,741	TL	132	6,742
18	7	6	6,741	TL	402	*6,741	TL	58	*6,741	TL	1,871	*6,741	TL	150	*6,741	TL	410	*6,741	TL	231	*6,741
18	7	7	6,741	TL	101	*6,741	TL	1,006	*6,741	TL	1,438	6,742	TL	670	*6,741	TL	333	*6,741	TL	800	*6,741
18	7	8	6,741	TL	683	*6,741	TL	72	*6,741	TL	1,229	*6,741	TL	277	*6,741	TL	320	*6,741	TL	454	6,742
20	8	3	7,230	93.95	15	*7,230	TL	6	*7,230	379.22	48	*7,230	302.62	149	*7,230	219.55	49	*7,230	TL	111	*7,230
20	8	4	6,856	TL	3,488	*6,856	TL	1,568	*6,856	TL	3,090	*6,856	TL	1,244	*6,856	TL	771	*6,856	TL	1,225	*6,856
20	8	5	6,626	TL	85	6,627	TL	2,174	*6,626	TL	2,703	*6,626	TL	1,509	6,627	TL	809	*6,626	TL	2,237	*6,626
20	8	6	6,626	TL	823	*6,626	TL	2,543	*6,626	TL	473	6,627	TL	1,038	*6,626	TL	1,104	6,627	TL	288	6,629
20	8	7	6,626	TL	785	*6,626	TL	1,182	6,627	TL	769	6,627	TL	679	*6,626	TL	2,333	*6,626	TL	3,165	6,627
20	8	8	6,626	TL	892	6,629	TL	1,599	6,627	TL	1,408	6,723	TL	2,051	*6,626	TL	1,139	6,627	TL	2,099	6,627
36	14	3	14,251	TL	1,078	*14,251	TL	490	*14,251	TL	947	*14,251	TL	910	*14,251	TL	909	*14,251	TL	2,616	14,507
36	14	4	13,727	TL	3,341	13,844	TL	2,032	13,803	TL	293	17,706	TL	3,068	13,771	TL	3,411	13,779	TL	3,579	31,729
36	14	5	13,387	TL	2,463	13,389	TL	3,463	13,478	TL	1,289	13,395	TL	1,931	13,389	TL	1,977	13,779	TL	2,800	13,854
36	14	6	13,387	TL	2,978	13,782	TL	2,554	13,813	TL	3,175	13,392	TL	2,284	13,403	TL	2,641	13,390	TL	3,574	13,467
36	14	7	13,387	TL	3,036	13,522	TL	1,547	13,804	TL	3,576	14,331	TL	3,368	13,389	TL	3,140	13,840	TL	3,471	13,401
36	14	8	13,387	TL	2,229	13,389	TL	1,786	13,532	TL	3,010	13,393	TL	2,797	13,388	TL	2,333	13,397	TL	3,367	13,781

表 6.2: 制約生成法における制約追加方針と部分巡回除却制約の比較 ($W = 18$)

J	S	ν	Opt	CG1-(5.2.11)			CG1-(5.2.14)			CG1-(5.2.15)			CG2-(5.2.11)			CG2-(5.2.14)			CG2-(5.2.15)		
				SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	UB
10	4	3	4,360	1.54	1	*4,360	1.56	1	*4,360	3.66	2	*4,360	1.30	1	*4,360	1.53	1	*4,360	2.90	1	*4,360
10	4	4	3,734	1.28	1	*3,734	1.02	0	*3,734	2.28	1	*3,734	1.14	0	*3,734	0.92	0	*3,734	2.59	2	*3,734
10	4	5	3,653	1.82	1	*3,653	1.55	0	*3,653	2.66	2	*3,653	2.07	0	*3,653	1.77	1	*3,653	3.12	1	*3,653
10	4	6	3,243	0.95	0	*3,243	0.81	0	*3,243	2.48	2	*3,243	0.93	0	*3,243	0.73	0	*3,243	1.69	1	*3,243
10	4	7	3,110	1.06	1	*3,110	1.03	1	*3,110	1.33	1	*3,110	0.91	0	*3,110	0.77	0	*3,110	1.85	1	*3,110
10	4	8	3,110	1.04	1	*3,110	1.10	1	*3,110	1.20	1	*3,110	0.88	0	*3,110	0.79	0	*3,110	1.69	1	*3,110
15	6	3	6,344	13.17	5	*6,344	3.62	2	*6,344	104.30	17	*6,344	23.81	12	*6,344	60.79	21	*6,344	81.06	25	*6,344
15	6	4	5,327	237.73	19	*5,327	153.33	5	*5,327	TL	43	*5,327	74.95	15	*5,327	58.84	9	*5,327	1,241.83	66	*5,327
15	6	5	5,039	273.66	65	*5,039	216.78	50	*5,039	245.22	42	*5,039	79.79	33	*5,039	82.15	6	*5,039	285.86	129	*5,039
15	6	6	4,823	174.87	38	*4,823	107.38	11	*4,823	176.64	11	*4,823	71.25	15	*4,823	42.94	9	*4,823	143.40	43	*4,823
15	6	7	4,697	152.61	57	*4,697	55.95	29	*4,697	62.80	33	*4,697	64.37	11	*4,697	49.19	11	*4,697	209.79	36	*4,697
15	6	8	4,641	76.97	13	*4,641	111.94	22	*4,641	114.68	18	*4,641	44.07	14	*4,641	51.35	18	*4,641	125.49	43	*4,641
18	7	3	7,363	121.36	4	*7,363	TL	3	*7,363	654.70	63	*7,363	184.58	15	*7,363	234.40	30	*7,363	240.27	55	*7,363
18	7	4	6,755	TL	216	*6,755	TL	398	*6,755	TL	61	*6,755	TL	178	*6,755	TL	104	*6,755	TL	894	*6,755
18	7	5	6,297	TL	700	*6,297	TL	123	*6,297	TL	619	*6,297	TL	111	*6,297	TL	284	*6,297	TL	2,237	*6,297
18	7	6	5,652	2,606.00	103	*5,652	1,347.61	239	*5,652	2,005.91	192	*5,652	596.11	40	*5,652	692.87	70	*5,652	1,964.34	39	*5,652
18	7	7	5,652	1,041.59	72	*5,652	936.06	88	*5,652	1,160.25	250	*5,652	1,329.35	90	*5,652	1,022.97	221	*5,652	2,768.04	90	*5,652
18	7	8	5,652	2,574.79	550	*5,652	1,275.87	61	*5,652	TL	112	*5,652	750.90	58	*5,652	1,504.74	177	*5,652	TL	55	*5,652
20	8	3	7,230	99.54	27	*7,230	90.92	8	*7,230	375.06	32	*7,230	169.71	40	*7,230	1,207.30	52	*7,230	TL	45	*7,230
20	8	4	6,507	TL	19	*6,507	TL	29	*6,507	TL	1,442	*6,507	TL	54	*6,507	TL	68	*6,507	TL	352	*6,507
20	8	5	5,966	TL	108	*5,966	TL	57	*5,966	TL	128	*5,966	TL	53	*5,966	TL	125	*5,966	TL	106	*5,966
20	8	6	5,823	TL	1,502	*5,823	TL	769	*5,823	TL	287	*5,823	TL	368	*5,823	TL	157	*5,823	TL	2,569	*5,823
20	8	7	5,630	TL	276	*5,630	TL	2,615	*5,630	TL	603	*5,630	TL	1,315	*5,630	TL	409	*5,630	TL	1,859	*5,630
20	8	8	5,630	TL	2,138	*5,630	TL	258	*5,630	TL	1,148	*5,630	TL	28	*5,630	TL	53	*5,630	TL	699	*5,630
36	14	3	14,251	TL	427	*14,251	TL	343	*14,251	TL	482	*14,251	TL	1,112	*14,251	TL	2,865	*14,251	TL	3,264	14,350
36	14	4	12,915	TL	1,796	13,016	TL	3,010	13,046	TL	2,409	13,002	TL	1,783	12,916	TL	3,563	13,073	TL	1,338	12,992
36	14	5	11,940	TL	1,834	12,326	TL	2,640	11,944	TL	3,261	12,317	TL	3,270	12,167	TL	3,181	12,332	TL	3,330	11,946
36	14	6	UNK	TL	1,238	11,754	TL	2,900	11,755	TL	2,937	11,667	TL	1,020	11,661	TL	3,081	11,812	TL	2,404	11,956
36	14	7	UNK	TL	3,353	11,756	TL	3,314	11,760	TL	3,508	12,179	TL	3,006	11,479	TL	1,508	11,622	TL	3,026	11,758
36	14	8	UNK	TL	2,633	11,508	TL	3,226	11,299	TL	3,100	11,489	TL	3,337	11,337	TL	3,303	11,466	TL	2,860	11,262

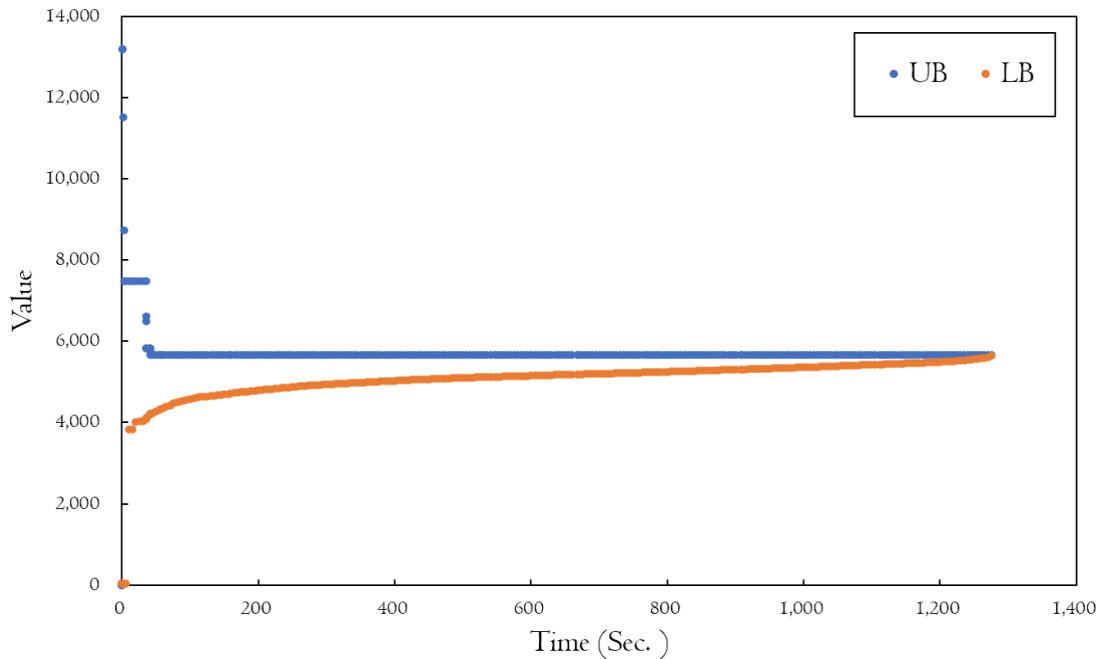


図 6.1: CG1-(5.2.14) の上界と下界 ($|J| = 18$, $|S| = 7$, $\nu = 8$, $W = 18$)

次に、制約生成法を用いたときの、最適値の上界と下界の改善の様子について述べる。図 6.1 は工事数 18, 立会者数 7, 各立会者に割り当てられる工事数の上限 8, 各立会者に割り当てられる工事の総難易度 18 の問題例に対する CG1-(5.2.14) の上界と下界の改善の様子を示しており、横軸は計算時間、縦軸は上下界値を表す。下界が最適値に一致するまでには時間を要しているが、上界は早い段階で最適値に近い値に到達した。具体的には、最適値が 5,652 であるのに対して、1 秒で 13,178, 2 秒で 11,515, 3 秒で 7,471, 35 秒で 6,605, 36 秒で 5,822, 41 秒で 5,821, 42 秒で 5,660, 57 秒で 5,655, 61 秒で 5,652 の目的関数値を持つ実行可能解が得られた。他の問題例に対しても、制約生成法の上界は早い段階で最適値に近い値に到達する傾向を観測している。

6.3 集合被覆アプローチの計算結果

5.1 節の集合被覆アプローチと、それに 5.3 節の手法を導入したものの比較結果を表 6.3 と 6.4 に示す。“Enum” は 5.1 節で紹介した、実行可能なルートを全列挙した

上で集合被覆アプローチによる定式化 (5.1.1)–(5.1.4) を解く手法を, “Enum+” は 5.3 節で紹介した, 最短巡回路のみをルートとして列挙し, 集合被覆アプローチによる定式化を解く手法を表す. “EnmNum” は生成されたルート数を, “EnmTime” はルート生成に要した時間を, “MdlTime” は集合被覆アプローチによる定式化を解くのに要した時間を, “SolTime” は EnmTime と MdlTime の合計を表す. また, “MO” は計算中にメモリ不足となり実行可能解が得られなかったことを表す. 具体的には, EnmTime が MO の場合はルート生成時にメモリ不足となり実行可能解が得られなかったことを, MdlTime が MO の場合はルート生成後に集合被覆アプローチによる定式化を解く時にメモリ不足となり実行可能解が得られなかったことを表す. EnmTime が TL の場合はルート生成時に制限時間に達して計算が打ち切れ, 制限時間内に実行可能解が 1 つも得られなかったことを表す. ルート生成時にメモリ不足あるいは制限時間に達して計算が打ち切れ, 集合被覆アプローチの定式化を解く過程に至らなかった場合 (すなわち EnmTime が MO あるいは TL の場合) は, MdlTime 欄に “-” と記す. Enum, Enum+ともに, MO あるいは TL と記したものを除いた全ての問題例に対して, 制限時間内に厳密な最適解を得ており, その結果それらの問題例に対する UB は Opt と一致するため, UB 欄を省略した.

表 6.3 と 6.4 より, Enum はルート生成の時間は小さいが, ルート生成数が大きく, 集合被覆アプローチによる定式化を解く時間が大きいことが観測できる. 一方, Enum+はルート生成の時間は大きい, ルート生成数が小さく, 集合被覆アプローチによる定式化を解く時間が小さいことが観測できる. 求解に要する総時間 SolTime を比べると, ν が 4 以下の問題例では, Enum でもルート生成数は比較的小さく, ほとんどの問題例で Enum+より Enum のほうが高速に最適解を得ている一方, ν が大きくなるにつれ Enum のルート生成数が大きくなり, ν が 5 以上の多くの問題例では, Enum より Enum+のほうが高速に最適解を得ている. この傾向は $|J|$ が大きいほど強く, $|J|$ や ν が大きい問題例に対しては Enum+のほうが有効であることが確認できた.

本研究で用いた問題例は実データに近いデータであり, 工事の数が立会者の数の 3 倍以内に収まっている. ν を大きくすると計算により得られた最適値は改善しているが, 表 6.3 に示す全ての問題例において ν を 5 より大きな値にしても $\nu = 5$ の場合と最適値は変わらないことがわかった. これは, $W = 9$ という制約によって, 実行可能なルートが制限され, ν を大きくしても生成されるルートがそれほど増えないことが原因と思われる. 実際, ルート生成数を示す EnmNum の値は, 6 以上の ν ではそれほど変化していない. 一方, 表 6.4 に示す問題例においては, ν が 6 以上の場合でも EnmNum の値は大きくなり, その結果, 計算時間が大きくなる, または

表 6.3: 集合被覆アプローチにおけるルート生成法の比較 ($W = 9$)

J	S	ν	Opt	Enum				Enum+			
				EnmNum	EnmTime	MdlTime	SolTime	EnmNum	EnmTime	MdlTime	SolTime
10	4	3	4,360	802	0.00	0.03	0.03	172	0.15	0.02	0.16
10	4	4	4,017	4,138	0.01	0.09	0.10	311	0.26	0.02	0.28
10	4	5	3,874	9,898	0.02	0.16	0.18	359	0.29	0.04	0.34
10	4	6	3,874	10,618	0.02	0.17	0.19	360	0.28	0.04	0.32
10	4	7	3,874	10,618	0.02	0.18	0.20	360	0.28	0.04	0.32
10	4	8	3,874	10,618	0.02	0.18	0.19	360	0.28	0.04	0.32
15	6	3	6,344	2,829	0.01	0.10	0.11	554	0.44	0.03	0.47
15	6	4	5,650	18,357	0.03	0.29	0.32	1,201	0.94	0.03	0.98
15	6	5	5,647	42,357	0.08	0.86	0.95	1,401	1.15	0.21	1.36
15	6	6	5,647	45,237	0.08	0.94	1.02	1,405	1.24	0.09	1.33
15	6	7	5,647	45,237	0.11	0.94	1.05	1,405	1.15	0.09	1.24
15	6	8	5,647	45,237	0.08	0.93	1.02	1,405	1.14	0.09	1.23
18	7	3	7,363	5,052	0.01	0.36	0.37	959	0.73	0.13	0.87
18	7	4	6,889	44,604	0.08	1.19	1.27	2,607	2.17	0.17	2.34
18	7	5	6,741	153,324	0.29	4.97	5.26	3,513	3.20	0.25	3.45
18	7	6	6,741	218,124	0.37	6.53	6.90	3,603	3.24	0.24	3.49
18	7	7	6,741	218,124	0.38	6.63	7.02	3,603	3.25	0.24	3.49
18	7	8	6,741	218,124	0.41	6.60	7.01	3,603	3.32	0.24	3.56
20	8	3	7,230	7,024	0.02	0.23	0.25	1,314	1.02	0.09	1.11
20	8	4	6,856	73,024	0.15	2.31	2.47	4,064	3.36	0.29	3.65
20	8	5	6,626	320,344	0.66	7.55	8.21	6,125	5.59	0.45	6.04
20	8	6	6,626	601,144	1.26	24.59	25.85	6,515	6.22	0.47	6.69
20	8	7	6,626	651,544	1.61	35.32	36.93	6,525	6.39	0.50	6.89
20	8	8	6,626	651,544	1.23	35.93	37.15	6,525	6.38	0.50	6.88
36	14	3	14,251	43,110	0.13	2.73	2.86	7,635	5.50	0.90	6.40
36	14	4	13,727	667,350	1.52	36.95	38.47	33,645	29.70	11.94	41.64
36	14	5	13,387	3,626,670	7.09	MO	MO	58,306	55.77	14.53	70.31
36	14	6	13,387	8,022,990	16.97	MO	MO	64,412	66.37	14.92	81.30
36	14	7	13,387	9,529,950	25.42	MO	MO	64,711	73.27	9.25	82.51
36	14	8	13,387	9,529,950	44.92	MO	MO	64,711	94.79	10.26	105.05

計算中にメモリ不足となり実行可能解が得られない問題例が増加した。

6.4 制約生成法と集合被覆アプローチの比較

本節では、制約生成法と集合被覆アプローチを比較する。制約生成法については、6.2 節でパラメータ設定などの組合せを変えて検証した 6 つの設定のうち CG1-(5.2.14) (以下 CG と記す) を、集合被覆アプローチについては、5.3 節で比較した 2 つの方法のうち Enum+ を本節の比較に用いる。これらの比較結果を表 6.5–6.9 に示す。表 6.5 と 6.6 は表 6.1 から 6.4 に用いたものと同じ問題例に対する計算結果である。表 6.7–6.9 はこれらに比べて $|S|$ が 3 以下と小さい (その結果平均ルート長が表 6.5 と 6.6 の問題例より長い) 問題例に対する計算結果であり、表 6.7 は $|J| \leq 20$, $W = 18$ の場合、表 6.8 と 6.9 は $|J| \geq 20$, $W = 36$ の場合である。また、3.1 節の定式化に対する計算結果も比較のため表 6.5–6.7 に示す (“TOM59Model” と記す)。なお、第 3 章では汎用ソルバーとして NUOPT を用いたが、本章では計算環境を揃えるために Gurobi Optimizer を用いて再実験した結果を示している。表 6.5, 6.6, 6.8 と 6.9

表 6.4: 集合被覆アプローチにおけるルート生成法の比較 ($W = 18$)

J	S	ν	Opt	Enum				Enum+			
				EnmNum	EnmTime	MdlTime	SolTime	EnmNum	EnmTime	MdlTime	SolTime
10	4	3	4,360	820	0.00	0.03	0.04	175	0.49	0.09	0.59
10	4	4	3,734	5,860	0.01	0.09	0.10	385	0.50	0.04	0.54
10	4	5	3,653	36,100	0.06	0.58	0.64	637	0.89	0.06	0.95
10	4	6	3,243	187,300	0.36	3.28	3.64	847	1.43	0.07	1.50
10	4	7	3,110	787,060	1.59	13.52	15.10	966	1.67	0.07	1.74
10	4	8	3,110	2,117,620	4.56	54.59	59.15	999	1.75	0.08	1.84
15	6	3	6,344	2,955	0.01	0.13	0.14	575	0.68	0.05	0.73
15	6	4	5,327	35,715	0.06	0.48	0.55	1,940	2.64	0.14	2.78
15	6	5	5,039	396,075	0.72	9.34	10.06	4,943	7.48	0.40	7.88
15	6	6	4,823	3,984,555	7.34	244.37	251.71	9,927	18.89	0.98	19.87
15	6	7	4,697	30,872,955	69.91	MO	MO	15,262	33.87	1.16	35.04
15	6	8	4,641	MO	MO	MO	MO	17,510	41.69	3.86	45.55
18	7	3	7,363	5,220	0.01	0.49	0.50	987	1.19	0.20	1.39
18	7	4	6,755	78,660	0.14	1.55	1.70	4,047	5.96	0.38	6.34
18	7	5	6,297	1,106,820	1.98	19.92	21.90	12,615	22.26	1.41	23.67
18	7	6	5,652	14,432,580	27.65	MO	MO	31,123	69.38	1.64	71.01
18	7	7	5,652	154,605,060	327.84	MO	MO	58,935	151.97	7.12	159.08
18	7	8	5,652	MO	MO	MO	MO	79,302	233.01	8.94	241.95
20	8	3	7,230	7,240	0.03	0.50	0.53	1,350	0.19	1.59	1.78
20	8	4	6,507	123,520	0.24	2.95	3.18	6,195	8.89	0.45	9.34
20	8	5	5,966	1,984,000	3.74	44.56	48.31	21,699	37.90	1.26	39.17
20	8	6	5,823	29,800,480	75.95	MO	MO	60,333	128.73	7.98	136.72
20	8	7	5,630	MO	MO	MO	MO	129,123	326.38	9.42	335.80
20	8	8	5,630	MO	MO	MO	MO	194,448	565.72	30.32	596.03
36	14	3	14,251	44,136	0.26	3.87	4.13	7,806	9.87	1.30	11.17
36	14	4	12,915	1,457,856	4.45	115.27	119.73	66,711	92.14	16.88	109.03
36	14	5	11,940	46,696,896	92.55	MO	MO	443,703	743.67	56.90	800.57
36	14	6	UNK	MO	MO	-	MO	TL	TL	-	TL
36	14	7	UNK	MO	MO	-	MO	TL	TL	-	TL
36	14	8	UNK	MO	MO	-	MO	TL	TL	-	TL

の“LB”は最適値の下界値（CGの計算過程で得られたもの）を表す。表6.8と6.9の“誤差(%)”はUBの最適値Optに対する相対誤差 $100(UB - Opt)/Opt$ (Optが不明な時はLBに対する相対誤差 $100(UB - LB)/LB$)である。

Enum+は、 $W = 9$ の全ての問題例(表6.5)を厳密に解いて探索を終了した。 $W = 18$ の問題例(表6.6と6.7)についても、表6.6の $|J| = 36$, $\nu = 6, 7, 8$ の3つの問題例を除く全ての問題例がEnum+によって厳密に解けた。それらの問題例を厳密に解くのに要した時間SolTimeは、表6.5と6.6の問題例ではEnum+が最も小さいが、表6.7の問題例ではEnum+はCGよりもやや大きい時間を要した。上述の3つの問題例、表6.8および6.9の多くの問題例に対しては、Enum+はルート生成時に制限時間に達して計算が打ち切れ、制限時間内に実行可能解が1つも得られなかった。表6.4, 6.8と6.9のEnum+のEnmTime欄のTLはこのことを表している。

CGとTOM59Modelは、表6.5–6.7の問題例を厳密に解くのに要する時間はEnum+よりも大きい場合が多く、制限時間内に計算が終了せず(つまり最適性の保証が得られず)TLと記されているものが多いものの、全ての問題例に対して制限時間内に実行可能解を得た。TOM59Modelは、UB欄に記した暫定値が最適値に一致している

(i.e., *印のついた) 問題例が, 表 6.5 で 30 問中 11 問, 表 6.6 で 30 問中 6 問, 表 6.7 で 10 問中 4 問と少ないものの, $|J| \leq 20$, $W = 9$ と $|J| = 10$, $W = 18$ の問題例に対しては, 最適値からの相対誤差は最大でも 10.7% であり, その 1 問を除きいずれも 10% 以下に抑えられている. 一方, $|J| = 36$, $W = 9$ と $|J| \geq 15$, $W = 18$ の問題例に対しては, 最適値 (最適値がわからない問題例については最良値) からの相対誤差が 10% を超えた問題例が表 6.5 で 6 問中 5 問, 表 6.6 で 24 問中 9 問であった.

それに対して, CG は, 厳密に解けた問題例は表 6.5 で 30 問中 13 問, 表 6.6 で 30 問中 16 問とやや少ないものの, UB 欄に記した暫定値が最適値に一致している問題例は, 表 6.5 と 6.6 それぞれで 30 問中 23 問であった. また, 最適値が判明している問題例に対して最適値からの相対誤差は表 6.5 で最大 3.2%, 表 6.6 で最大 1.1% であった. 表 6.6 の最適値が判明していない問題例 3 問に対して UB と LB の誤差は最大で 48.8% と大きいものの, 表 6.5 と 6.6 の問題例のうち, 最適値が判明しており, しかも CG の SolTime 欄が TL である問題例に対しては, LB と UB の誤差が大きい場合でも UB と Opt は近い傾向にあることや, 図 6.1 で観測した傾向 (UB の方が LB よりもかなり早く最適値に近づく) から, LB と UB の誤差が大きい要因は, 良質の LB が得られていないことにある可能性が高いと類推される. 表 6.7 の問題例は CG によって全て厳密に解けており, 求解に要した時間 SolTime は Enum+ より小さい. 表 6.8 と 6.9 の問題例は $|J| \leq 22$ では CG によって全て厳密に解けており, それら 18 問に対して CG が求解に要した時間 SolTime は, $|J| = 21$, $\nu = 7$ と $|J| = 22$, $\nu = 8$ の 2 問を除いて Enum+ より小さい. また, $|J| \geq 23$ では CG によって厳密に解けた問題例は 84 問中 7 問と少ないものの, 全ての問題例に対して CG は実行可能解を得ている. LB との乖離がやや大きい問題例もあるものの, 誤差が 20% を超える問題例は 84 問中 3 問, 15–20% のものは 6 問と少ない. また, 上述のように, 誤差が大きい要因は多くの場合 LB にあるであろうことが類推される. これら 84 問に対しては, Enum+ では 2 問を除いて実行可能解が得られなかったことから, このような問題例に対する CG の有用性は高いと言える.

TOM59Model は整数計画問題を一度解けばよく, 制約生成のような反復計算を含まないため, 数理モデルを記述して汎用ソルバーを適用するためにかかる手間が少なく済む. そのため, $|J|$ が小さい問題例 ($|J| \leq 20$) しか解く必要がなく, しかも解が多少悪くても (e.g., 相対誤差 10% 程度) 許容できる場合に有用である. Enum+ は, 表 6.5–6.7 のほとんどの問題例 (表 6.6 の最後の 3 問以外), 表 6.8 と 6.9 の小規模な問題例に対して, 高速に厳密な最適解を得ることができた. 平均ルート長が小さい表 6.5–6.6 の問題例に対しては, CG では SolTime が TL になっている問題例でも Enum+ は短時間で最適解を得ている場合が多い. CG と Enum+ の両方で厳密

表 6.5: CG と Enum+ の比較結果 ($W = 9$)

J	S	ν	Opt	CG1-(5.2.14)				Enum+		TOM59Model		
				SolTime	ArrTime	UB	LB	SolTime	ArrTime	SolTime	ArrTime	UB
10	4	3	4,360	0.78	0	*4,360	-	0.16	0	1,003.87	155	*4,360
10	4	4	4,017	2.74	1	*4,017	-	0.28	0	TL	3,310	4,020
10	4	5	3,874	2.15	1	*3,874	-	0.34	0	TL	1,148	*3,874
10	4	6	3,874	2.41	1	*3,874	-	0.32	0	TL	1,595	*3,874
10	4	7	3,874	3.25	2	*3,874	-	0.32	0	TL	2,869	*3,874
10	4	8	3,874	2.00	1	*3,874	-	0.32	0	TL	1,023	*3,874
15	6	3	6,344	8.39	7	*6,344	-	0.47	0	TL	2,291	*6,344
15	6	4	5,650	137.97	11	*5,650	-	0.98	0	TL	551	*5,650
15	6	5	5,647	229.30	151	*5,647	-	1.36	1	TL	2,456	*5,647
15	6	6	5,647	247.23	196	*5,647	-	1.33	1	TL	1,800	5,654
15	6	7	5,647	179.58	127	*5,647	-	1.24	1	TL	3,193	5,750
15	6	8	5,647	166.06	105	*5,647	-	1.23	1	TL	166	*5,647
18	7	3	7,363	147.08	3	*7,363	-	0.87	0	TL	1,265	*7,363
18	7	4	6,889	TL	265	*6,889	6,117	2.34	2	TL	3,205	6,981
18	7	5	6,741	TL	226	*6,741	5,866	3.45	3	TL	3,176	6,750
18	7	6	6,741	TL	58	*6,741	5,977	3.49	3	TL	960	6,977
18	7	7	6,741	TL	1,006	*6,741	5,911	3.49	3	TL	2,682	6,898
18	7	8	6,741	TL	72	*6,741	5,742	3.56	3	TL	1,999	6,747
20	8	3	7,230	TL	6	*7,230	6,822	1.11	1	TL	162	*7,230
20	8	4	6,856	TL	1,568	*6,856	5,676	3.65	3	TL	3,497	7,055
20	8	5	6,626	TL	2,174	*6,626	5,899	6.04	6	TL	1,172	6,733
20	8	6	6,626	TL	2,543	*6,626	5,544	6.69	6	TL	407	7,337
20	8	7	6,626	TL	1,182	6,627	5,687	6.89	6	TL	344	7,281
20	8	8	6,626	TL	1,599	6,627	5,662	6.88	6	TL	3,584	6,717
36	14	3	14,251	TL	490	*14,251	13,06	6.40	6	TL	3,281	15,321
36	14	4	13,727	TL	2,032	13,803	8,685	41.64	39	TL	3,399	15,368
36	14	5	13,387	TL	3,463	13,478	9,333	70.31	70	TL	3,189	17,439
36	14	6	13,387	TL	2,554	13,813	8,659	81.30	81	TL	3,486	16,739
36	14	7	13,387	TL	1,547	13,804	9,101	82.51	81	TL	3,081	15,115
36	14	8	13,387	TL	1,786	13,532	9,609	105.05	104	TL	3,597	22,876

に解けた問題例に関しては、CG の SolTime が Enum+ より小さい問題例に対しても、表 6.7 の最初の 1 問と表 6.8 の 2 問（具体的には、 $|J| = 20$, $|S| = 3$, $\nu = 11$ と $|J| = 21$, $|S| = 3$, $\nu = 10$ の問題例）を除き、Enum+ の SolTime は CG の数倍程度に収まっている。これらのことと、ルート生成が制限時間内に終了した全ての問題例を Enum+ が厳密に解いていることから、平均ルート長が小さい問題例に対しては、厳密な最適解を得るためのアルゴリズムとしての性能は総じて Enum+ の方が高いといえる。一方で、表 6.8 と 6.9 の問題例のように平均ルート長が表 6.5–6.7 のものより長い場合、その多くに対し Enum+ は制限時間内にルート生成が終了せず、実行可能解を得られなかった。これに対して CG は、表 6.5–6.9 の全ての問題例に対して実行可能解を得ており、最適値が判明した全ての問題例に対してその誤差は 3.2% 以下と小さく、それ以外の問題例の多くに対しても誤差は比較的小さい。とくに、表 6.8 の問題例に関しては、 $|J| \leq 22$ の全て問題例が CG によって厳密に解けている。表 6.8 と 6.9 の $|J| \geq 23$ の問題例に関しても、その多くに対して最適値は判明しておらず、下界値 LB との誤差がやや大きい問題例もあったものの、多くに対して CG によって良質の解が得られている。 $|J|$, ν および W が共に大きい問題例の場合、Enum+ では実行可能解を得られない可能性があることを考慮すると、試し

表 6.6: CG と Enum+ の比較結果 ($W = 18, |S| \geq 4$)

J	S	ν	Opt	CG1-(5.2.14)				Enum+		TOM59Model		
				SolTime	ArrTime	UB	LB	SolTime	ArrTime	SolTime	ArrTime	UB
10	4	3	4,360	1.56	1	*4,360	-	0.59	0	1,086.64	102	*4,360
10	4	4	3,734	1.02	0	*3,734	-	0.54	0	TL	241	*3,734
10	4	5	3,653	1.55	0	*3,653	-	0.95	0	TL	1,105	*3,653
10	4	6	3,243	0.81	0	*3,243	-	1.50	1	TL	1,869	3,287
10	4	7	3,110	1.03	1	*3,110	-	1.74	1	TL	1,413	3,287
10	4	8	3,110	1.10	1	*3,110	-	1.84	1	TL	1,643	3,245
15	6	3	6,344	3.62	2	*6,344	-	0.73	0	TL	2,291	*6,344
15	6	4	5,327	153.33	5	*5,327	-	2.78	2	TL	551	5,650
15	6	5	5,039	216.78	50	*5,039	-	7.88	7	TL	2,456	5,647
15	6	6	4,823	107.38	11	*4,823	-	19.87	18	TL	1,800	5,654
15	6	7	4,697	55.95	29	*4,697	-	35.04	33	TL	3,193	5,750
15	6	8	4,641	111.94	22	*4,641	-	45.55	44	TL	166	5,647
18	7	3	7,363	TL	3	*7,363	6,833	1.39	1	TL	119	*7,363
18	7	4	6,755	TL	398	*6,755	6,128	6.34	5	TL	3,476	6,757
18	7	5	6,297	TL	123	*6,297	5,860	23.67	23	TL	2,421	6,314
18	7	6	5,652	1,347.61	239	*5,652	-	71.01	69	TL	1,721	5,736
18	7	7	5,652	936.06	88	*5,652	-	159.08	158	TL	1,794	5,656
18	7	8	5,652	1,275.87	61	*5,652	-	241.95	239	TL	2,391	5,845
20	8	3	7,230	90.92	8	*7,230	-	1.78	0	TL	1,897	*7,230
20	8	4	6,507	TL	29	*6,507	5,784	9.34	8	TL	1,036	6,511
20	8	5	5,966	TL	57	*5,966	5,361	39.17	38	TL	1,948	6,083
20	8	6	5,823	TL	769	5,827	4,935	136.72	132	TL	3,424	5,966
20	8	7	5,630	TL	2,615	*5,630	4,815	335.80	335	TL	3,000	6,171
20	8	8	5,630	TL	258	5,632	4,453	596.03	595	TL	2,385	5,870
36	14	3	14,251	TL	343	*14,251	13,271	11.17	10	TL	1,533	14,540
36	14	4	12,915	TL	3,010	13,046	8,935	109.03	104	TL	22	26,666
36	14	5	11,940	TL	2,640	11,944	8,745	800.57	799	TL	1,949	14,329
36	14	6	UNK	TL	2,900	11,755	8,219	TL	TL	TL	2,980	16,316
36	14	7	UNK	TL	3,314	11,760	7,904	TL	TL	TL	3,496	14,711
36	14	8	UNK	TL	3,226	11,299	7,851	TL	TL	TL	3,103	17,550

表 6.7: CG と Enum+ の比較結果 ($W = 18, |S| \leq 3$)

J	S	ν	Opt	CG1-(5.2.14)			Enum+		TOM59Model		
				SolTime	ArrTime	UB	SolTime	ArrTime	SolTime	ArrTime	UB
15	2	8	7,686	1.56	1	*7,686	33.35	33	TL	154	*7,688
15	3	5	7,690	4.38	2	*7,690	5.78	5	1,064.63	72	*7,690
15	3	6	7,611	10.27	7	*7,611	13.50	13	TL	246	7,613
15	3	7	7,117	17.34	9	*7,117	23.16	23	TL	1,025	*7,117
15	3	8	7,093	15.95	9	*7,093	29.02	29	TL	306	7,289
18	3	6	9,428	27.68	10	*9,428	45.23	45	TL	224	*9,428
18	3	7	9,367	48.32	11	*9,367	101.11	101	TL	2,117	9,428
18	3	8	8,978	44.61	22	*8,978	152.31	152	TL	419	9,018
20	3	7	9,761	156.31	103	*9,761	216.04	216	TL	1,859	10,108
20	3	8	9,761	127.85	36	*9,761	372.46	372	TL	424	10,038

た問題例ではそのようなことの起こっていない CG は有用であるといえる。以上より、これらを実践的に利用する方法として、CG と Enum+ の 2 つの実装が可能な場合には、まず Enum+ を適用し、実行可能解が得られないときには CG を用いる使い方が、2 つの実装が難しい場合には、TOM59Model を実装して適用するのが効率的であると考えられる。

表 6.8: CG と Enum+ の比較結果 ($W = 36, |S| = 3, |J| \leq 29$)

J	S	ν	Opt	CG1-(5.2.14)					Enum+			
				SolTime	ArrTime	UB	LB	誤差 (%)	EnmNum	EnmTime	SolTime	ArrTime
20	3	7	9,761	102.30	67	*9,761	-	0.0	137,979	223.77	228.06	228
20	3	8	9,761	286.85	157	*9,761	-	0.0	263,949	516.37	546.56	546
20	3	9	9,520	515.56	331	*9,520	-	0.0	431,909	1,026.65	1,064.54	1,057
20	3	10	8,891	309.70	254	*8,891	-	0.0	616,665	1,749.78	1,788.69	1,788
20	3	11	8,878	289.77	194	*8,878	-	0.0	784,625	2,739.32	2,779.01	2,779
20	3	12	8,878	376.13	241	*8,878	-	0.0	TL	TL	TL	TL
21	3	7	7,791	1,797.11	213	*7,791	-	0.0	198,439	361.68	368.42	368
21	3	8	11,260	734.26	194	*11,260	-	0.0	401,929	884.26	929.26	929
21	3	9	11,172	702.06	151	*11,172	-	0.0	695,859	1,798.60	1,871.51	1,858
21	3	10	10,183	265.11	162	*10,183	-	0.0	1,048,575	2,951.35	3,024.81	3,018
21	3	11	9,930	430.17	231	*9,930	-	0.0	TL	TL	TL	TL
21	3	12	9,930	635.97	154	*9,930	-	0.0	TL	TL	TL	TL
22	3	8	12,278	2,604.08	105	*12,278	-	0.0	600,369	1,237.98	1,257.93	1,257
22	3	9	12,129	871.30	113	*12,129	-	0.0	1,097,789	2,567.69	2,656.1	2,650
22	3	10	11,651	918.98	174	*11,651	-	0.0	TL	TL	TL	TL
22	3	11	10,880	338.42	202	*10,880	-	0.0	TL	TL	TL	TL
22	3	12	10,880	313.77	70	*10,880	-	0.0	TL	TL	TL	TL
22	3	13	10,880	283.33	55	*10,880	-	0.0	TL	TL	TL	TL
23	3	8	13,199	TL	1,499	*13,199	12,623	0.0	880,969	1,827.30	1,950.14	1,950
23	3	9	12,729	2,141.09	340	*12,729	-	0.0	TL	TL	TL	TL
23	3	10	12,251	1,191.04	153	*12,251	-	0.0	TL	TL	TL	TL
23	3	11	UNK	TL	115	11,700	10,850	7.8	TL	TL	TL	TL
23	3	12	UNK	TL	714	11,700	10,495	11.5	TL	TL	TL	TL
23	3	13	UNK	TL	797	11,700	10,839	7.9	TL	TL	TL	TL
24	3	8	13,368	TL	1,856	*13,368	11,622	0.0	1,271,625	2,871.10	2,916.19	2,916
24	3	9	UNK	TL	1,774	12,898	12,309	4.8	TL	TL	TL	TL
24	3	10	12,420	2,562.14	972	*12,420	-	0.0	TL	TL	TL	TL
24	3	11	12,167	1,539.16	306	*12,167	-	0.0	TL	TL	TL	TL
24	3	12	UNK	TL	1,097	11,987	11,673	2.7	TL	TL	TL	TL
24	3	13	UNK	TL	432	12,017	10,648	12.9	TL	TL	TL	TL
25	3	9	UNK	TL	222	13,713	12,711	7.9	TL	TL	TL	TL
25	3	10	UNK	TL	503	13,397	13,138	2.0	TL	TL	TL	TL
25	3	11	13,144	1,310.53	482	*13,144	-	0.0	TL	TL	TL	TL
25	3	12	UNK	TL	1,583	13,148	11,957	10.0	TL	TL	TL	TL
25	3	13	UNK	TL	1,927	12,721	11,809	7.7	TL	TL	TL	TL
25	3	14	UNK	TL	1,331	12,920	11,455	12.8	TL	TL	TL	TL
26	3	9	UNK	TL	2,706	13,995	12,625	10.9	TL	TL	TL	TL
26	3	10	UNK	TL	1,420	13,679	13,093	4.5	TL	TL	TL	TL
26	3	11	13,426	2,054.85	762	*13,426	-	0.0	TL	TL	TL	TL
26	3	12	UNK	TL	2,332	13,426	13,016	3.1	TL	TL	TL	TL
26	3	13	UNK	TL	2,652	13,389	11,505	16.4	TL	TL	TL	TL
26	3	14	UNK	TL	828	12,868	11,966	7.5	TL	TL	TL	TL
27	3	9	UNK	TL	2,814	16,539	12,540	31.9	TL	TL	TL	TL
27	3	10	UNK	TL	1,769	14,229	13,299	7.0	TL	TL	TL	TL
27	3	11	13,976	3,154.80	1,802	*13,976	-	0.0	TL	TL	TL	TL
27	3	12	UNK	TL	1,589	13,976	13,384	4.4	TL	TL	TL	TL
27	3	13	UNK	TL	3,475	14,386	11,633	23.7	TL	TL	TL	TL
27	3	14	UNK	TL	2,455	13,867	12,285	12.9	TL	TL	TL	TL
28	3	10	UNK	TL	785	14,580	13,445	8.4	TL	TL	TL	TL
28	3	11	UNK	TL	3,562	14,321	13,947	2.7	TL	TL	TL	TL
28	3	12	UNK	TL	791	14,325	13,235	8.2	TL	TL	TL	TL
28	3	13	UNK	TL	2,702	14,325	13,405	6.9	TL	TL	TL	TL
28	3	14	UNK	TL	2,830	14,231	12,448	14.3	TL	TL	TL	TL
28	3	15	UNK	TL	2,066	14,221	13,151	8.1	TL	TL	TL	TL
29	3	10	UNK	TL	2,652	14,844	13,511	9.9	TL	TL	TL	TL
29	3	11	UNK	TL	2,088	14,591	13,934	4.7	TL	TL	TL	TL
29	3	12	UNK	TL	2,026	14,591	13,947	4.6	TL	TL	TL	TL
29	3	13	UNK	TL	1,611	14,631	13,666	7.1	TL	TL	TL	TL
29	3	14	UNK	TL	2,861	14,538	12,834	13.3	TL	TL	TL	TL
29	3	15	UNK	TL	333	14,942	12,667	18.0	TL	TL	TL	TL

表 6.9: CG と Enum+ の比較結果 ($W = 36, |S| = 3, |J| \geq 30$)

J	S	ν	Opt	CG1-(5.2.14)					Enum+			
				SolTime	ArrTime	UB	LB	誤差 (%)	EnmNum	EnmTime	SolTime	ArrTime
30	3	10	UNK	TL	2,433	15,410	13,711	12.4	TL	TL	TL	TL
30	3	11	UNK	TL	2,925	15,154	14,267	6.2	TL	TL	TL	TL
30	3	12	UNK	TL	761	15,190	14,020	8.3	TL	TL	TL	TL
30	3	13	UNK	TL	1,300	15,155	13,966	8.5	TL	TL	TL	TL
30	3	14	UNK	TL	1,329	15,047	13,806	9.0	TL	TL	TL	TL
30	3	15	UNK	TL	1,675	15,193	13,275	14.5	TL	TL	TL	TL
31	3	11	UNK	TL	638	15,854	14,387	10.2	TL	TL	TL	TL
31	3	12	UNK	TL	3,497	16,055	13,973	14.9	TL	TL	TL	TL
31	3	13	UNK	TL	3,571	16,017	14,593	9.8	TL	TL	TL	TL
31	3	14	UNK	TL	1,837	15,666	14,091	11.2	TL	TL	TL	TL
31	3	15	UNK	TL	3,487	15,134	13,204	14.6	TL	TL	TL	TL
31	3	16	UNK	TL	1,610	15,064	13,270	13.5	TL	TL	TL	TL
32	3	11	UNK	TL	2,187	16,108	14,588	10.4	TL	TL	TL	TL
32	3	12	UNK	TL	2,752	16,105	14,662	9.8	TL	TL	TL	TL
32	3	13	UNK	TL	2,299	16,129	14,546	10.9	TL	TL	TL	TL
32	3	14	UNK	TL	2,034	16,110	14,539	10.8	TL	TL	TL	TL
32	3	15	UNK	TL	2,056	15,903	14,139	12.5	TL	TL	TL	TL
32	3	16	UNK	TL	2,439	15,946	14,384	10.9	TL	TL	TL	TL
33	3	11	UNK	TL	2,171	16,909	14,886	13.6	TL	TL	TL	TL
33	3	12	UNK	TL	1,456	16,664	14,391	15.8	TL	TL	TL	TL
33	3	13	UNK	TL	3,297	16,343	14,564	12.2	TL	TL	TL	TL
33	3	14	UNK	TL	1,699	16,275	14,781	10.1	TL	TL	TL	TL
33	3	15	UNK	TL	1,818	16,313	14,664	11.2	TL	TL	TL	TL
33	3	16	UNK	TL	3,542	16,369	14,246	14.9	TL	TL	TL	TL
34	3	12	UNK	TL	885	16,946	15,426	9.9	TL	TL	TL	TL
34	3	13	UNK	TL	2,171	16,909	14,886	13.6	TL	TL	TL	TL
34	3	14	UNK	TL	3,201	16,993	14,838	14.5	TL	TL	TL	TL
34	3	15	UNK	TL	2,020	16,964	14,657	15.7	TL	TL	TL	TL
34	3	16	UNK	TL	1,168	17,003	14,815	14.8	TL	TL	TL	TL
34	3	17	UNK	TL	3,011	16,972	14,758	15.0	TL	TL	TL	TL
35	3	12	UNK	TL	2,562	17,363	15,683	10.7	TL	TL	TL	TL
35	3	13	UNK	TL	2,689	17,412	15,544	12.0	TL	TL	TL	TL
35	3	14	UNK	TL	1,583	17,436	15,525	12.3	TL	TL	TL	TL
35	3	15	UNK	TL	3,178	17,292	15,380	12.4	TL	TL	TL	TL
35	3	16	UNK	TL	3,277	17,358	15,017	15.6	TL	TL	TL	TL
35	3	17	UNK	TL	2,801	17,297	15,111	14.5	TL	TL	TL	TL
36	3	12	UNK	TL	2,306	18,210	15,954	14.1	TL	TL	TL	TL
36	3	13	UNK	TL	2,176	19,559	15,589	25.5	TL	TL	TL	TL
36	3	14	UNK	TL	2,785	17,634	15,781	11.7	TL	TL	TL	TL
36	3	15	UNK	TL	2,677	17,777	16,034	10.9	TL	TL	TL	TL
36	3	16	UNK	TL	1,985	17,651	15,628	12.9	TL	TL	TL	TL
36	3	17	UNK	TL	2,637	18,016	15,859	13.6	TL	TL	TL	TL

第7章 まとめ

本稿では、高度な技能を有している手配者により意思決定が行われている工事立会者手配業務に対し、実用的な手配結果を算出可能な数理モデルとそれに対する解決手法を得ることを目的として事例研究を行った。数理最適化手法を活用することで得られる結果に抵抗を持たれることがしばしば起こるが、本研究でも研究の初期に考案した数理モデルによって得られた解は、手配者が実用的と判断できるものではなかった。そこで、その問題点を解消するために、解を提示しては手配者の意見を聞いて、数理モデルを修正する試行錯誤のプロセスが必要であった。この過程で提示した4つの数理モデルによって得られた解を、ルートおよび割当に関する2つの相違度と、それらの重み付き和を用いて比較した。その結果、重み付き和に基づく相違度において重みを適切に設定すれば、手配者が手作業で作成した手配結果と数理モデルによる手配結果の間の相違度が、数理モデルを修正するに従って減少することを観測した。これは、手配者の解との相違度が減少するように数理モデルの改善を行うことで、得られる解が手配者が実用的と評価する結果に近づくことを示唆している。このような試行錯誤の結果提示した数理モデルによる手配結果は、概ね実用的であるとの評価を手配者より受けている。

さらに、工事立会者手配問題に対して、現実的な時間で良質の解が得られる手法を得るため、実行可能なルート候補の全列挙に基づく集合被覆アプローチによる定式化、制約生成法に基づく定式化、および実行可能なルート候補を削減した集合被覆アプローチによる定式化を検証した。工事の部分集合の各々に対して最適なルートのみを生成する集合被覆アプローチ Enum+は、ルート候補が多くメモリ不足になるような問題例を除き、実験に用いた多くの問題例に対して高速に厳密な最適解を得ることができた。とくに、立会者1人当たりの平均工事数 $|J|/|S|$ が3程度と小さい、現場の状況に近い問題例に対しては、Enum+では短時間で厳密に解けた問題例でも、制約生成法に基づく手法 CG では制限時間内に最適性の保証が得られなかったものも多く、CGによって Enum+より早く厳密に解けた問題例に対しても両者の差はそれほど大きくなかった。したがって、そのような問題例に対しては、厳密な最適解を得るためのアルゴリズムとしての性能は総じて Enum+の方が高いと

いえる。一方で，立会者 1 人当たりの平均工事数が多くなると Enum+ はルート生成に時間がかかりすぎて現実的でなくなる傾向にあり，たとえば立会者数 $|S| = 3$ の場合は平均工事数 $|J|/|S|$ が 7 を超えると，調べたほとんどの問題例に対してルート生成が制限時間内に終わらず，実行可能解を得ることすらできなかった。これに対して CG は，そのような問題例も含めて，調べた全ての問題例に対して実行可能解を得ており，最適値が判明した全ての問題例に対してその誤差は 3.2% 以下と小さく，それ以外の問題例の多くに対しても誤差は比較的小さい。Enum+ では実行可能解を得られない可能性があることを考慮すると，試した問題例ではそのようなことの起こっていない CG は実践的手法として有用であるといえる。計算実験に用いた問題例は実データをもとに生成したものであり，検証した手法がそのような問題例に対して，現実的な時間で良質の解を得ることを確認した。

本稿で紹介した結果は特定の事例に対する限られた実験結果に基づいており，広く応用できる一般的な知見を得るには，より多くの事例やデータに対する検証が必要である。また，割当に関する相違度に関しては，本研究では各工事に割り当てられた立会者の相違に基づいて相違度を定義したが，この相違度では，スキルレベルが近い人でも大きく異なる人でも同様に評価されてしまう。また，スキルレベルなどの属性が同じでも個人が違えば相違度に寄与してしまう。これらの点を改善する相違度についても今後検討したいと考えている。

謝辞

まず、研究活動全般にわたって御指導をいただきました、指導教員である柳浦睦憲教授に心より厚く御礼申し上げます。柳浦睦憲教授との日々のミーティングで議論や洞察に満ちたご助言があったからこそ、本研究を発展させることができたと感じております。また、オペレーションズ・リサーチという研究全般に関する視野や展望など、今後の自身の研究活動を考えていく上で重要な知見を授けていただいたことにも、深く感謝しております。

次に、研究を進める上で、有益な議論にご参加くださった呉偉様、池上敦子様にも心より厚く御礼申し上げます。ご自身のご経験を踏まえた研究に対する方向性のアドバイスをいただくことで、私自身の今後のキャリアの具体化することができたと感じております。

次に、博士後期課程への進学するきっかけを作っていたいただいた、吉田寛主任研究員（NTT アクセスサービスシステム研究所アクセスオペレーションプロジェクトオペレーション基盤技術グループ）に心より厚く御礼申し上げます。ご自身の社会人ドクターでの経験やライフプラン等、今後の人生を充実化するための見識をいただけたと感じております。

次に、研究の推進にご協力いただいた、小林敦志課長（NTT 西日本デジタル改革推進部システムイノベーション部門顧客システム担当）、井口隆宏部長（NTT 西日本デジタル改革推進部システムイノベーション部門顧客システム担当）、織克典課長（NTT 西日本デジタル改革推進部デジタルガバナンス部門IT 基盤戦略担当）、永留圭祐主査（NTT スマートコネクティブメディアビジネス部）に心より厚く御礼申し上げます。働きながら大学院に進学していることを気にかけて心身共に心配くださり、常に応援いただけたため、4年間を無事に乗り越えることができました。

次に、スキル差を考慮した人員資源割当問題に関する展示をした際に、工事の立会者の手配で活用できそうとお声がけ頂いた、NTT インフラネットの堀江豊司課長、手配者の方々に心より厚く御礼申し上げます。私の研究が実際に実社会で役立てられ、今後増々、事例研究の重要であることに気づくことができました。

次に、名古屋大学大学院情報学研究科数理情報学専攻の事務を担当してくださっ

ている加藤瑞恵様，柳浦研究室，NTT アクセスサービスシステムアクセスオペレーションプロジェクトおよび，西日本電信電話株式会社デジタル改革推進部の皆様に，本研究をまとめるにあたり，様々な御協力，励ましの御言葉を賜りました．深く御礼申し上げます．

最後に，研究生生活を支援いただいた全ての皆様，および，両親に感謝いたします．

参考文献

- [1] NTT, 事業案内.
<https://group.ntt.jp/business> (Retrieved on January 1, 2023)
- [2] 国土交通省, *NTTグループにおける無電柱化の取り組みについて*.
<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/chicyuka/pdf03/07.pdf> (Retrieved on January 1, 2023)
- [3] 国土交通省, *インフラ老朽化対策* (平成 27 年 9 月 11 日 第 2 回 非社会保障ワーキング・グループ 資料 1-3 国土交通省資料).
<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg2/270911/agenda.html>
(Retrieved on October 13, 2019)
- [4] 国土交通省, *浅層埋設にあたっての安全対策について* (2015 年 7 月 31 日 第 5 回 無電柱化低コスト手法技術検討委員会 資料 3 浅層埋設にあたっての安全対策について).
<http://www.nilim.go.jp/lab/ucg/koho/k150731.html> (Retrieved on October 13, 2019)
- [5] NTT 東日本, *電話ケーブル切ったら大へん* (NTT 東日本 東京事業部 2018).
http://kirenkyo.gr.jp/sites/default/files/doc/NTT_higashi2018.pdf (Retrieved on October 13, 2019)
- [6] NTT 西日本, *管路・電柱等*.
<https://www.ntt-west.co.jp/open/99guidebook/pdf/2-6syo.pdf> (Retrieved on October 13, 2019)
- [7] 月刊ビジネスコミュニケーション, *ワンストップサービスを提供する インフラネットの IT システム群*.
<https://www.bcm.co.jp/magazine/00-02/html/052.html> (Retrieved on October 13, 2019)

- [8] 一柳徳宏, 若松良彦, 能島裕介, 石渕久生, 多目的遺伝的局所探索アルゴリズムにおける局所探索適用個体の選択, システム制御情報学会論文誌, 23 (2010) 178–187.
- [9] 田村坦之, 柴田智裕, 富山伸司, 鳩野逸生, 組合せ多目的最適化問題に対するメタ戦略型満足化トレードオフ法, 計測自動制御学会論文集, 34 (1998) 844–849.
- [10] 磯野昂士, 奥村誠, コンパクトシティ制作における複数の計画規範のトレードオフ構造の分析, 都市計画論文集, 52 (2017) 413–420.
- [11] 池上敦子, 問題把握の難しさ, 特集『21世紀を最適化する女性たち』, オペレーションズ・リサーチ, 51 (2006) 388–391.
- [12] 柳浦睦憲, 茨木俊秀, 組合せ最適化—メタ戦略を中心として, 朝倉書店, 2001.
- [13] 土谷隆, 最適化: モデリングとアルゴリズム, 応用数理, 518 (1995) 95–105.
- [14] 長谷部勝也, 池上敦子, 野々部宏司, ナーススケジューリング: 最適解の多数生成と特徴分析, RAMP シンポジウム論文集, (2017) 99–114.
- [15] 高橋香, ブルノフィゲラロウレンソ, 赤池洋一, 山口梨恵, 山本剛大, 林田真治, 池上敦子, 小学校における授業時間割作成, 情報処理学会論文誌数理モデル化と応用, 10 (2017) 80–91.
- [16] 谷崎隆士, 片岡隆之, タクシー待機場所におけるタクシー配置台数の最適化, 日本経営システム学会誌, 31 (2014) 201–206.
- [17] Google, *Directions API* の概要.
<https://developers.google.com/maps/documentation/directions/overview> (Retrieved on January 6, 2023)
- [18] S. Umetani, M. Arakawa and M. Yagiura, Relaxation heuristics for the set multicover problem with generalized upper bound constraints, *Computers and Operations Research*, 93 (2018) 90–100.
- [19] 株式会社 NTT データ数理システム, *Nuorium Optimizer* 紹介資料.
<https://www.msi.co.jp/solution/nuopt/introduction.html> overview (Retrieved on January 6, 2023)

- [20] 株式会社オクターバー・スカイ, *Gurobi Optimizer*.
<https://www.octobersky.jp/products/gurobi> overview (Retrieved on January 6, 2023)
- [21] 日本 — IBM, *CPLEX Optimizer*.
<https://www.ibm.com/jp-ja/analytics/cplex-optimizer> overview (Retrieved on January 6, 2023)
- [22] G. B. Dantzig and R. H. Ramser, The Truck Dispatching Problem, *Management Science*, 6 (1959) 80–91.
- [23] 久保幹雄, J. P. ペドロソ, 村松正和, A. レイス, あたらしい数理最適化: Python 言語と Gurobi で解く, 近代科学社, 2012.
- [24] H. Hashimoto, M. Yagiura and T. Ibaraki, An iterated local search algorithm for the time-dependent vehicle routing problem with time windows, *Discrete Optimization*, 5 (2008) 434–456.
- [25] S. Lin and B. W. Kernighan, An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem, *Operations Research*, 21 (1973) 498–516.
- [26] M. Yagiura and T. Ibaraki, Local Search, P.M. Pardalos and M.G.C. Resende (eds), *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press (2002) 104–123.
- [27] 野々部宏司, メタヒューリスティクスを用いた制約最適化ソルバーのナースケジューリング問題への適用, 電気学会研究会, 17 (2010) 303–315.
- [28] 野々部宏司, 茨木俊秀, 汎用アルゴリズムとしての CSP (制約充足問題) に対するタブー探索アプローチ, 数理解析研究所講究録, 1015 (1997) 123–136.
- [29] 徳永拓真, 田中勇真, 小林隆文, 沓水佑樹, 池上敦子, 非正社員を主力とするスタッフスケジューリングにおけるモデル化と支援システムの構築, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, 8 (2015) 57–65.
- [30] G. Dantzig, R. Fulkerson, S. Johnson, Solution of a large-scale traveling-salesman problem, *Journal of the Operations Research Society of America*, 2 (1954) 393–410.

- [31] U. Pferschy, R. Staněk, Generating subtour elimination constraints for the TSP from pure integer solutions, *Central European Journal of Operations Research*, 25 (2017) 231–260.
- [32] R. H. Pearce, *Towards a General Formulation of Lazy Constraints*, Doctoral Dissertation, School of Mathematics and Physics, The University of Queensland, (2019).
- [33] P. Toth, D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem*, SIAM, (2002).
- [34] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvátal, W. J. Cook, *The Traveling Salesman Problem*, Princeton University Press, (2011).
- [35] H. Crowder, M. W. Padberg, Solving large-scale symmetric travelling salesman problems to optimality, *Management Science*, 26 (1980) 495–509.

主著論文

学術雑誌論文

- 高須賀将秀, 柳浦睦憲, 工事手配業務に対する数理最適化の活用と意思決定の支援, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, 14 (2021) 112–120.
- 高須賀将秀, 呉偉, 柳浦睦憲, 工事立会者手配問題に対する制約生成法および集合被覆アプローチ, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, 15 (2022) 1–10.

国内発表

- 高須賀将秀, 柳浦睦憲, 工事手配業務に対する数理最適化の活用と意思決定の支援, MPS研究会 (131), オンライン, 2021年2月.
- 高須賀将秀, 呉偉, 柳浦睦憲, 工事立会者手配問題に対する制約生成法に基づく厳密解法, スケジューリングシンポジウム 2021, オンライン, 2021年8月.
- 高須賀将秀, 呉偉, 柳浦睦憲, 工事立会者手配問題に対する制約生成法および集合被覆アプローチ, MPS研究会 (138), 沖縄(オンライン), 2022年6月.

招待講演

- 高須賀将秀, 工事立会者手配業務に対する数理最適化の活用と意思決定の支援, NTTデータ数理システム アカデミックコンファレンス 2021年度, (2022).

受賞

- 高須賀将秀, 工事手配業務に対する数理最適化の活用と意思決定の支援, NTTデータ数理システム学術奨励賞 2020年度春 佳作, (2020).

- 高須賀将秀, 呉偉, 柳浦睦憲, 工事立会者手配問題に対する集合被覆アプローチ, *NTTデータ数理システム学術奨励賞 2021年度 優秀賞*, (2022).

特許

- 高須賀将秀, 意思決定支援装置、意思決定支援プログラム及び意思決定支援方法, 特許第 6971297 号, 2021 年 11 月.
- 高須賀将秀, 小林敦志, 意思決定支援装置、意思決定支援プログラム及び意思決定支援方法, 特許第 7042322 号, 2022 年 3 月.

その他論文

国際会議 (査読付き)

- M. Takasuga, T. Hirata, A Necessary and Sufficient Condition for a Bipartite Distance-Hereditary Graph to Be Hamiltonian, in: J. Akiyama, M. Kano, T. Sakai, eds., Computational Geometry and Graphs (TJJCCGG), 2012, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8296 143–149, Springer, Berlin, Heidelberg.

国内発表

- 高須賀将秀, 平田富夫, 距離遺伝2部グラフ上のハミルトン閉路アルゴリズム, LA シンポジウム, 京都, 2012年2月.
- 高須賀将秀, 吉田寛, 能力差を考慮した開発における人員資源割り当てに関するモデル提案, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2016春, 博多, 2016年3月.
- 高須賀将秀, 吉田寛, 能力差を考慮した開発における人員資源割当問題に対する解法の提案, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2016秋, 札幌, 2016年9月.
- 高須賀将秀, 吉田寛, 能力差を考慮した開発における人員資源割当問題に対する解法の提案, MPS研究会 (112), 盛岡, 2017年2月.
- 高須賀将秀, 小川新治, 吉田寛, 非HTML画面のオペレーションサポートシステムに対する試験自動化ツールの導入, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 2017秋, 名古屋, 2017年9月.
- 高須賀将秀, 吉田寛, 非HTML画面のオペレーションサポートシステムに対する試験自動化ツールの導入と改善案の提案, ICM研究会, 高松, 2017年11月.

受賞

- 高須賀将秀, 能力差を考慮した開発における人員資源割当問題について, *NTT データ数理システム学術奨励賞 2019年度 佳作*, (2019).
- 高須賀将秀, パーソナル情報を活用した人材配置問題の解決方法の提案, *NTT データ数理システム学術奨励賞 2020年度秋 優秀賞*, (2020).

特許

- 高須賀将秀, 吉田寛, スケジューリング方法、スケジューリング装置及びスケジューリングプログラム, 特許第 6649180 号, 2020 年 1 月.
- 高須賀将秀, 吉田寛, 柴田朋子, 井上正輝, 人員の手配装置、手配方法及び手配プログラム, WO-A1-2021/059506, 2019/9.
- 高須賀将秀, 吉田寛, 柴田朋子, 人員の手配装置、手配方法及び手配プログラム, WO-A1-2021/064881, 2019/10.

展示

- 高須賀将秀, モノ, コト, ヒトに関する情報を一元化するシステム, つくばフォーラム 2018, つくば, 2018 年 10 月.
- 高須賀将秀, ヒトの意図を反映する最適采配技術, つくばフォーラム 2019, つくば, 2019 年 10 月.
- 高須賀将秀, ヒトの高度な判断を再現する采配高度化技術, つくばフォーラム 2020, つくば, 2020 年 10 月.
- 高須賀将秀, ヒトの行動心理に連動したタスクを割り当てる選考調律技術, つくばフォーラム 2022, つくば, 2022 年 5 月.