

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

高須賀 将秀^{1,2,a),b)} 柳浦 睦憲^{2,c)}

概要: 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、補修工事が日々行われている。その工事を行うときに NTT の設備を傷つけてしまうことを防ぐため、各工事に NTT 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、また、各社員が担当する工事を全て巡回したときの総移動時間を小さくしたい、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などの複数の要件や要望を考慮する必要がある。実社会の工事の割当の意思決定には高度な技能が必要になる。本論文では、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、手配者が違和感を持つ部分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。

1. はじめに

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、施設保全度の確保及びライフコストの縮減と予算の平準化を図るため、道路施設の点検及び補修工事が計画的に行われている [1]。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 [2]。地下ケーブルの一部は日本電信電話株式会社 (以後 NTT) が有しており、立会が必要な工事には NTT の社員が立会っている [3], [4], [5]。

このとき、各工事に立会う社員 (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 [6]、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、現状では手配者の勘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 [7]。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、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。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。以下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及び改善を行った事例を紹介する。その際、以下の点を考慮した。

- (a) 手配者の嗜好を、目的関数の重みを変更することで表現できること。
- (b) 現実的な計算時間で最適解または良質な実行可能解が得られること。

一般に、数理最適化手法を活用することで得られる結果

¹ 西日本電信電話株式会社

² 名古屋大学大学院情報科学研究科数理情報学専攻

a) masahide.takasuka.tc@west.ntt.co.jp

b) takasuka@nagoya-u.jp

c) yagiura@nagoya-u.jp

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、手配者が違和感を感じるものであった。そこで、そのような違和感を解消するために、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様々な数理モデルによって得られた解を、手配者が手作業で作成した手配結果と比較した結果、それらの間の相違度が、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思える結果に近づくことを示唆している。

2. 工事手配問題について

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手配問題と呼ぶ。人手で工事手配を行う際には、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。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1は現場の手配者が実際に割当を行った結果である。

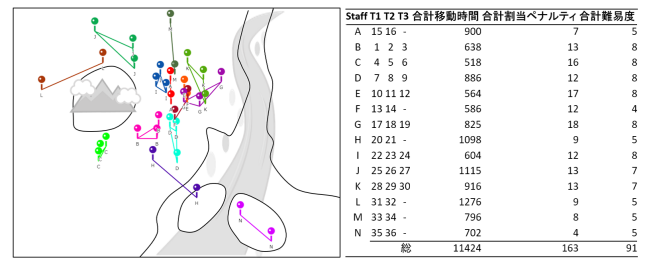


図1 工事手配問題に対する手配者による手配結果

3. 工事手配問題の数理モデル

本節では、工事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

工事手配問題では、立会者の集合 S および工事の集合 J 、 $k \in J$ 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 の棒 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、

$$\text{minimize} \quad \sum_{s \in S} D_s + \alpha \sum_{t \in T} \sum_{k \in J} \sum_{s \in S} c_{sk} x_{skt} \quad (1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{k \in J \cup J'} x_{skt} = 1, \quad \forall s \in S, \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} x_{skt} = 1, \quad \forall k \in J \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in J} w_k x_{skt} \leq W, \quad \forall s \in S \quad (4)$$

$$D_s = \sum_{t \in T} \sum_{k, l \in J \cup J'} d_{kl} x_{skt} x_{sl(t+1)}, \quad \forall s \in S \quad (5)$$

$$x_{skt} \in \{0, 1\}, \quad \forall s \in S, \forall k \in J \cup J', \forall t \in T \quad (6)$$

と定式化できる。目的関数 (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 (2) は各立会者 s がどの棒 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) 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 (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。(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棒 $|T| + 1$ を棒1とみなす。

数理モデル (1)–(6) に対する解が有限の目的関数値を持つとき、(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

2 節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 $|S| = 14$ 、棒数 $|T| = 3$ 、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。

本研究では、求解に 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るため、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1,000まで10ずつ変更した。その結果、12個の相異なる解を得た。 $\alpha = 50$ 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。

4. 集合被覆アプローチによる数理モデル

前節の数理モデルに 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、前節の数理モデルの定式化とは異なる集合被覆アプローチで定式化することで、より高速に最適解を得ることを狙う。

本研究が対象とする実データでは、立会者はたかだか3箇所しか巡回しないことに着目し、事前に実行可能なルートを全て列挙する。このとき、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。

4.1 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：

$$\text{minimize} \quad \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} (\tilde{d}_r + \alpha \tilde{c}_{rs}) y_{rs} \quad (7)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} a_{kr} y_{rs} \geq 1, \quad \forall k \in J \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R} y_{rs} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad (9)$$

$$y_{rs} \in \{0, 1\}, \quad \forall r \in R, \forall s \in S. \quad (10)$$

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 [9]、集合被覆問題 (7), (8), (10) に、各立会者 s に対応するルートの中からたかだか一つしかルートを選択

できないことを表す制約 (9) が加わっている。

4.2 最適解を得るのに要する計算時間の比較

本節では、3 節の数理解モデル (1)–(6) と 4 節の数理解モデル (7)–(10) に対して NUOPT が厳密な最適解を得るのに要する計算時間を比較する。そのために、10 個の問題例を準備した。問題例 9 は、3.2 節の数値実験でも用いた実データである。問題例 1–8 は、問題例 9 の工事と立会者からランダムにいくつかを抽出した架空のデータである。問題例 10 は、問題例 9 に別の工事データの工事と立会者を加えた架空のデータである。

3 節と 4 節の数理解モデルに対する NUOPT の計算時間を表 1 に示す。表中の “–” は、制限時間の 24 時間以内に最適解が得られなかったことを示す。小規模な問題例については、3 節の数理解モデル (1)–(6) のほうが最適解の求解計算時間が小さいものがあるが、大規模な問題例を含む多くの問題例において、4 節の数理解モデル (7)–(10) のほうが高速に厳密な最適解を得ていることがわかる。

表 1 最適解求解時間

問題例	工事数 [件]	立会者数 [人]	3 節のモデルの 計算時間 [秒]	4 節のモデルの 計算時間 [秒]
1	10	4	0.16	1.33
2	11	4	0.63	2.01
3	12	5	4.66	3.40
4	13	5	19.13	5.31
5	15	6	51.79	8.54
6	16	6	867.12	17.46
7	18	7	1267.93	35.29
8	20	8	20509.11	75.50
9	36	14	–	3472.71
10	40	15	–	8174.45

5. 数理解モデルの比較と検証

3 節で述べた工事手配問題に対する数理解モデルは、現場の手配者へのヒアリング結果を数理解モデルに反映し、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解モデルを修正したが、数理解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。本節では、数理解モデルに対する手配者の満足度に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解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。

5.1 検証に用いる数理解モデルと得られる解について

本節では、数理解モデルの修正を行う過程で手配者に提示した 3 つの数理解モデルと最終的に得られた 3 節の数理解モデル

に対して得られる解を比較に用いる。まず、3 つの数理解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。

数理解モデル 1. 1 つ目の数理解モデルとして、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。これを数理解モデル 1 と呼ぶ。3 節の数理解モデルとの相違点は、目的関数 (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 (4) がないことである。本数理解モデルは、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、配送計画問題に帰着できる。本数理解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 [8] のアルゴリズムを用いた。

数理解モデル 2. 数理解モデル 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。これを数理解モデル 2 と呼ぶ。3 節の数理解モデルとの相違点は、目的関数 (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 (4) がないことである。

数理解モデル 3. 数理解モデル 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 (1) 式の第 2 項を導入したモデルを考えた。これを数理解モデル 3 と呼ぶ。3 節の数理解モデルとの相違点は、工事の難易度に関する制約 (4) がないことである。

5.2 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 5.1 節の 3 つの数理解モデルおよび 3 節の数理解モデル (便宜上、以下では数理解モデル 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 2 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、数理解モデル 1 と数理解モデル 2 の結果、数理解モデル 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解モデル 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 2 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 の数理解モデル 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

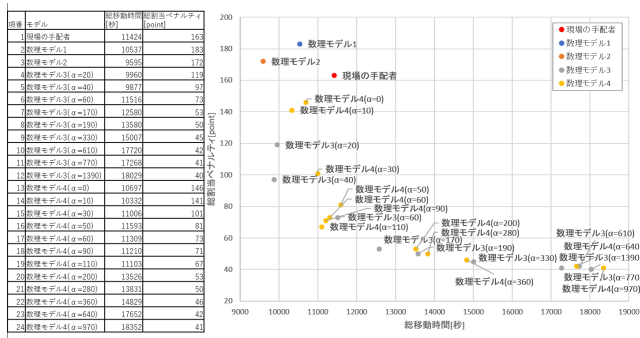


図 2 数理モデルと項番の対応および総移動時間と総割当ペナルティの散布図

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良いと感じる結果は項番 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。

5.3 手配結果の相違度について

工事割当問題は、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。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。

工事間の移動ルートに関する解の相違度。 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。

工事の立会者への割当に関する解の相違度。 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。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。

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 H_A と H_B の重み付き和を

$$H_C = H_A + \beta H_B \quad (11)$$

と記す。 $\beta (\geq 0)$ は H_A と 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。

5.3.1 現実の工事データに対する手配結果の比較

5.2 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。紙面の都合上 H_A と H_B の行列そのものの掲載は省略し、これらから観測された傾向について記載する。

まず、 H_A については、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。

次に、 H_B については、手配者による手配結果と数理モデルの解との相違度はいずれも 31 以上であった。割当に関する相違度の最大値が工事数 $|J| = 36$ であることを考えると、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く、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 33、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 31 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 5.1 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、2 節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。

最後に、2 種の相違度の重み付き和 H_C に基づいて手配結果を比較する。(11) 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。

便宜上、数理モデル i ($i = 1, 2, 3, 4$) の手配結果の項番

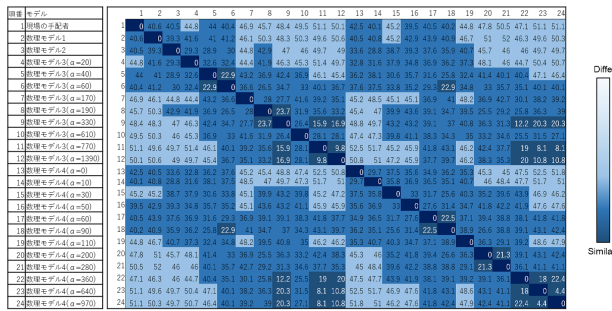


図 3 解の相違度行列 H_C ($\beta = 0.70$)

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、 $e_i(\beta) = \min_{u \in N_i} h_{1u}^C$ 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：

$$\text{maximize } \delta \quad (12)$$

$$\text{subject to } \delta \leq e_i(\beta) - e_{i+1}(\beta), \quad i = \{1, 2, 3\} \quad (13)$$

$$\beta \geq 0. \quad (14)$$

数理モデル (12)–(14) から得られる最適解は $\beta = 0.7$ である。このとき、数理モデルを改良するごとに現場の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小さくなり、数理モデル間の相違度の差の最小値 δ が最大となる。つまり、数理モデルを変更するたびに解が改善されたことと手配者が感じた事実が距離に反映される。 $\beta = 0.7$ のときの相違度行列 H_C を図 3 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 40.6, 40.5, 40.4, 39.5 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。

6. 結論及び今後の展望

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した。また、手配者が違和感を持つ部分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を減少することを数値実験により示した。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 一柳徳宏, 若松良彦, 能島裕介, 石淵久生, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.