

医療機関におけるスケジューリング支援システムの試作

—愛知医科大学病院の事例—

M2014SS008 大西愛乃

指導教員：鈴木敦夫

1 はじめに

近年、多くの医療機関では、最先端の情報システムを活用し、医師の負担軽減や研修医教育の効率化が図られている。これまでに、オペレーションズ・リサーチの手法を用いた様々な問題解決によって、医療現場の効率や研修医教育の質は高くなっている [5]。しかし、麻酔科医のシフトスケジューリングや研修医の診療科ローテーションスケジューリングなど、未だ手作業で行われているスケジューリング問題も数多くある。手作業であるがため、作成に手間や時間がかかっていることや、スケジューリングが条件を満たしていないといった問題がある。スケジューリングのための支援システムが病院のシステムの機能として組み込まれている場合もあるが、多くの場合、それらの機能は役割を果たしていない。それは、それらのシステムは現場の要望を十分に反映できない、思う通りのスケジューリングができないなどの理由からである。したがって、医療機関のスケジューリングの担当者は、これらのスケジューリングを行うのに手作業で長い時間をかけている。

このようなスケジューリング問題は、部局ごとに小規模なシステムを利用して解決することが適切な場合が多い。実際、現在の PC の計算能力と、最適化ソフトウェアの能力を利用すれば、通常の PC 上に実用的なシステムを構成することができる。

スケジューリング支援システムを作成するに当たっては、医療現場での要望をできる限り取り入れる必要がある。これまでの研究により、スケジュールの作成者が必要な修正を適切に行えるような、いわば対話型のシステムが現場で受け入れられる可能性が高いことがわかっていく。

日本全国には、約 8,400 施設の病院があり、それらの病院でこのようなスケジューリング問題の解決ができれば、医療現場の効率化や研修医教育の質の向上に大きく貢献することができる。ここでは、われわれが取り組んでいる病院内の麻酔科医のシフトスケジューリング問題や研修医の診療科ローテーションスケジューリング問題をオペレーションズ・リサーチを用いたスケジューリング支援システムによって解決する方法について紹介する。紹介するシステムはスケジュールを作成している医師、病院スタッフとの共同開発である。現在のところ、実際の現場で試用されており、システムの使い勝手や解の品質、有用性について検証し、改善を重ねている。

2 麻酔科医のシフトスケジューリング

麻酔科医のシフトスケジューリングは、ある程度経験を積んだ麻酔科医が過酷な業務と並行して行っている。スケジュール作成者は、多数の麻酔科医の毎月分のスケジュー

ルを手作業と既存のスケジューリング支援システムを組み合わせて作成している。その際には、既存のシステムでは思う通りのスケジューリングができないことから、スケジュールを一度既存のシステムで作成した後、手作業で大幅に修正を加えることで完成させている。修正を加える際に、各麻酔科医の希望するシフトにはならない可能性や、勤務回数が偏っているといった問題が生じている。

これらの問題は、現在のスケジュール作成方法によって生じている。スケジュール作成者はまず、手作業で昼間の勤務の割当を行う [1]。その後この割当に従い、われわれの研究グループが開発したスケジューリング支援システムを使用して、夜間の勤務の割当を行っている [2, 4]。この方法によって、どの医師をどの勤務に割り当てるか 1 か月分の割当を決定するのに、約 1 週間かかっている。この方法は、昼間のスケジュールに従う際に手間がかかる上に、作成時間が増加する問題がある。また夜間のスケジュールの一部のみ修正する場合に、昼間のスケジュールの条件を変更する必要がある、場合によっては昼間のスケジュールの大幅な変更が生じることがある。

2.1 問題解決の方法とその有効性について

先に述べた問題を解決するために、麻酔科医のシフトスケジューリングを混合整数計画法の問題として定式化する。そして、短時間で効率よくスケジューリングを行う自動化システムを数理計画ソフトウェアを用いて実現し、実際の現場に導入する。

具体的には、昼間の勤務と夜間の勤務の割当を同時に行うスケジューリング支援システムを実装する。割当を同時に行うことで、各麻酔科医にとって昼間の勤務と夜間の勤務の両方の勤務回数を公平に割り当てたスケジュールが短時間で作成できる。

2.2 麻酔科医のシフトスケジューリングの定式化

麻酔科医のシフトスケジューリングの定式化の一部を示す。省略した式は、スケジューリング問題において典型的な式である。

定式化においては、すべてのシフトに割り当てることができるダミーの医師を実際の医師に加える。実際の医師のみでは制約条件が満たされない場合は、ダミーの医師が割り当てられる。そして、ダミーの医師に割り当てられる勤務回数の総和を目的関数とし、それを最小化する。

制約としては、必ず満たさなければならない制約となるべく満たさなければならない制約を設けている。これは、パラメータによって実行不可能となってしまうことを避けるためである。医師毎におけるシフトの均等化については、昼間の勤務と夜間の勤務の間の関係の制約や、各勤務種類の間関係の制約を設定することで、均等化

を行う。また、あらかじめ割当を固定させるための定数、制約条件を設けている。これらは、あらかじめ割当が決まっているもの、あるいは修正を行う際に割当を固定させたい箇所のために用いる。

2.2.1 記号の定義

定式化にあたり、以下のように記号の定義を行う。

添字集合

- D : 医師全体の集合 $d \in D$
- D_1 : ダミー医師を除いた医師の集合
- D_2 : ダミー医師の集合
- T : 日にちの集合 $t \in T$
- S_1 : 昼間（午前・午後）の勤務種類の集合 $s \in S_1$
- S_2 : 夜間の勤務種類の集合 $s \in S_2$
- S : 勤務種類の全体の集合 $s \in S$

定数

- α, β, γ :
目的関数における各項の優先順位を決める重み
 $\alpha \geq \beta \geq \gamma \geq 0$

決定変数

- $x_{dts} = \begin{cases} 1: \text{医師 } d \text{ が } t \text{ 日の午前の勤務 } s \text{ を行う} \\ 0: \text{その他の場合} \end{cases}$
- $y_{dts} = \begin{cases} 1: \text{医師 } d \text{ が } t \text{ 日の午後の勤務 } s \text{ を行う} \\ 0: \text{その他の場合} \end{cases}$
- $z_{dts} = \begin{cases} 1: \text{医師 } d \text{ が } t \text{ 日の夜間の勤務 } s \text{ を行う} \\ 0: \text{その他の場合} \end{cases}$
- o_{dts}, u_{dts} : 医師 d が昼間の勤務 s を行った t 日に、夜間の勤務 s を行うことを緩和する変数
- v_{dts}, w_{dts} : 医師 d が夜間の勤務 s を行った次の日 t に、昼間の勤務 s を行うことを緩和する変数

2.2.2 定式化

目的関数

以下に、本研究で用いた目的関数の一部を示す。省略した項は、文献 [4] に記載されている。

$$\begin{aligned} \min \quad & \alpha \sum_{d \in D_2} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S_1} (x_{dts} + y_{dts}) \\ & + \beta \sum_{d \in D_2} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S_2} z_{dts} \\ & + \gamma \sum_{d \in D_1} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} (o_{dts} + u_{dts} + v_{dts} + w_{dts}) \end{aligned} \quad (1)$$

制約条件

以下に、本研究で考慮した制約条件の一部を示す。他の条件は、文献 [4] を参照のこと。

$$\begin{aligned} x_{d,t,s} + z_{d,t,s'} &\leq 1 + o_{d,t,s''}, \\ y_{d,t,s} + z_{d,t,s'} &\leq 1 + u_{d,t,s''}, \\ d \in D, \quad t \in T, \quad s \in S_1, \quad s' \in S_2, \quad s'' \in S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} z_{d,t,s'} + x_{d,t,s''} &\leq 1 + v_{d,t+1,s''}, \\ z_{d,t,s'} + y_{d,t,s''} &\leq 1 + w_{d,t+1,s''}, \quad d \in D, \\ t \in T - 1, \quad s \in S_1, \quad s' \in S_2, \quad s'' \in S \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} o_{dts} &\in \{0, 1\}, \quad u_{dts} \in \{0, 1\}, \\ v_{dts} &\in \{0, 1\}, \quad w_{dts} \in \{0, 1\}, \\ d \in D, \quad t \in T, \quad s \in S \end{aligned} \quad (4)$$

式の説明

- (1) 1か月にダミー医師に割り当てる昼間の勤務と夜間の勤務の合計回数とそれぞれ緩和のための変数の総和を最小化する
- (2) 1人の医師につき、昼間の勤務を行う日は夜間の勤務をなるべく行わない
- (3) 1人の医師につき、夜間の勤務を行った日は次の日の昼間の勤務をなるべく行わない
- (4) バイナリ制約

2.3 計算機実験とシステムの構築

愛知医科大学病院の実際のデータをもとに、最適化ソフトウェア IBM ILOG CPLEX を用いて、解を求めた。システムは VBA を用いて、Microsoft Excel 上に実装した。実装したシステムの一画面を図 1 に示す。

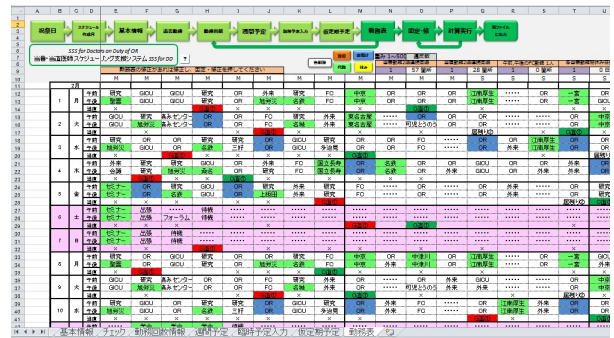


図 1 麻酔科医のシフトスケジューリング支援システムのインターフェース

スケジュール作成者は、図 1 に示される画面上部のボタンを順に押すことで操作を行う。また、画面右上部では、目的関数におけるパラメータの値を変更できる。スケジュール作成者はこの変更を、現在のスケジュールにおける目的関数値を確認しながら行うことができる。このように、容易にパラメータを変更できるようにシステムを設計することで、作成者の意向に柔軟に適應できるスケジューリングが可能になることが期待できる。

2.4 問題の規模と計算結果

麻酔科医の人数：ダミーの医師 5 人を含む 49 人、日数：1 か月と翌月の 3 日、昼間の勤務：4 種類、夜間の勤務：7 種類、各定数：任意に設定、とした。以上のデータをもとに計算した結果、変数：155,152、制約式：1,920,021、計算時間は約 1 分だった。なお、計算に使用した計算機環境は、CPU：Intel Core i5-3210M、RAM：4.00GB、OS：Microsoft Windows 7 である。

3 研修医の診療科ローテーションスケジュールリング

研修医とは、医師免許取得後、幅広い診療能力を習得するために大学病院又は臨床研修病院で2年間の臨床研修を受けている医師である。研修医はこの研修期間に、内科・外科・小児科など複数の診療科をローテーションし、各診療科で研修を受ける。愛知医科大学病院では、病院内の卒後臨床研修センターに所属する医師が、研修医が月ごとにどの診療科で研修を行うかを決めている。スケジュール作成者は、1年間のローテーションスケジュールを作成するのに手作業で3日費やしている。近年では、研修医教育の質の向上のため、スケジュールを作成する際に研修医ごとの希望を取り入れている。そして、なるべく全ての研修医の希望に沿うようなスケジュールが作成されている [3]。

しかし、手作業であるため月ごとに診療科に配属される研修医数に偏りが生じ、診療科の人数過多や人員不足が起こっている。それによって、希望に沿わない診療科へ配属される研修医がいるといった問題がある。さらに、研修医の国家試験の合格状況によって、スケジュールを一度作成した後に研修医数に変更が生じる場合がある。そのため、ローテーション開始直前までスケジュールを変更しなければならず、手間と時間がかかっている。

3.1 問題解決の方法とその有効性について

先に述べた問題を解決するために、研修医の診療科ローテーションスケジュールリングを0-1整数計画法の問題として定式化する。そして、短時間で効率よくスケジュールリングを行う自動化システムを数理計画ソフトウェアを用いて実現し、実際の現場に導入する。

具体的には、診療科に配属される研修医数の公平性をもたらす、研修医の希望を最大限に満たした解が得られるシステムを実装する。

3.2 研修医の診療科ローテーションスケジュールリングの定式化

研修医の診療科ローテーションスケジュールリングの定式化の一部を示す。ここでも、麻酔科医のシフトスケジュールリングの定式化と同様、スケジュールリング問題で頻出する式は省略している。また、あらかじめ割当を固定させるための定数、制約条件を設けている。

定式化では、研修医の内科の診療科の希望を全て満たすことができない場合や、同じ診療科を連続した月に割り当てることができない場合に実行不可能となってしまうことを避けるため、ペナルティを設定する。そして、ペナルティの総和を最小化することで、これらの条件をなるべく満たすようにする。また、診療科の月ごとにおける研修医数については、上下限値のパラメータを設定することで均等化する。月によって研修医数に偏りがあった場合、これらのパラメータを調節することで複数月において均等化することができる。

3.2.1 記号の定義

定式化にあたり、以下のように記号の定義を行う。

添字集合

R : 研修医の集合 $r \in R$

M : スケジュールリング対象月 $m \in M$

M_{ae} : 翌年3,4月を除く月の集合

M_k : 4月, 翌年4月を除く月の集合

M_2 : 4~5月, 翌年4月を除く月の集合

D_{int} : 内科の診療科の集合

D_a : 麻酔科

D_e : 救命救急科

D : 診療科全体の集合 $d \in D = \{1, \dots, 14\}$

定数

$ni_{rd} = \begin{cases} 1: \text{研修医 } r \in R \text{ が診療科 } d \in D_{int} \text{ を希望する} \\ 0: \text{その他の場合} \end{cases}$

d_{md}^- : 各診療科の各月の定員数の下限値

d_{md}^+ : 各診療科の各月の定員数の上限値

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$:

目的関数における各項の優先順位を決める重み

$\alpha \geq \beta \geq \gamma \geq \delta > 0$

決定変数

$x_{rmd} = \begin{cases} 1: \text{研修医 } r \text{ が } m \text{ 月の診療科 } d \text{ に割り当てられる} \\ 0: \text{その他の場合} \end{cases}$

dp_{rd} : 研修医 r が希望した内科の診療科 d に割り当てられることを緩和する変数

aep_{rm} : 研修医 r において、麻酔科が m 月に割り当てられた場合には、その翌々月に救命救急科が割り当てられることを緩和する変数

up_{rmd} : 研修医 r において、内科の診療科 d が複数月に渡って割り当てられる場合には、連続する m 月に割り当てられることを緩和する変数

ep_{rm} : 研修医 r において、救命救急科は m 月とその翌月に連続して割り当てられることを緩和する変数

3.2.2 定式化

目的関数

$$\begin{aligned} \min \quad & \alpha \sum_{r \in R} \sum_{d \in D} dp_{rd} + \beta \sum_{r \in R} \sum_{m \in M_{ae}} aep_{rm} \\ & + \gamma \sum_{r \in R} \sum_{m \in M_k} \sum_{d \in D_{int}} up_{rmd} \\ & + \delta \sum_{r \in R} \sum_{m \in M_2} ep_{rm} \end{aligned} \quad (5)$$

制約条件

以下に、本研究で考慮した制約条件の一部を示す。それ以外の制約式については、文献 [4] を参照のこと。

$$\sum_{m \in M} x_{rmd} \geq ni_{rd} - dp_{rd}, \quad r \in R, \quad d \in D_{int} \quad (6)$$

$$x_{rmd} - x_{r,m+1,d} \leq up_{rmd},$$

$$r \in R, \quad m \in M_k, \quad d \in D_{int} \quad (7)$$

$$x_{rmd} - x_{r,m+1,d} \leq ep_{rmd},$$

$$r \in R, \quad m \in M_2, \quad d \in D_e \quad (8)$$

$$x_{rmd} - x_{r,m+2,d'} \leq aep_{rmd},$$

$$r \in R, \quad m \in M_{ae}, \quad d \in D_a, \quad d' \in D_e \quad (9)$$

$$d_{md}^- \leq \sum_{r \in R} x_{rmd} \leq d_{md}^+, \quad m \in M, \quad d \in D \quad (10)$$

$$dp_{rd} \in \{0, 1\}, \quad r \in R, \quad d \in D_{int} \quad (11)$$

$$up_{rmd} \in \{0, 1\}, \quad r \in R, \quad m \in M_k, \quad d \in D \quad (12)$$

$$ep_{rmd} \in \{0, 1\}, \quad r \in R, \quad m \in M_2 \quad (13)$$

$$aep_{rmd} \in \{0, 1\}, \quad r \in R, \quad m \in M_{ae} \quad (14)$$

式の説明

- (5) それぞれのパナルティを最小化する
- (6) 1人の研修医につき、なるべく希望した内科の診療科に割り当てる
- (7) 1人の研修医につき、同じ種類の内科はなるべく連続した月に割り当てる
- (8) 1人の研修医につき、救命救急科はなるべく2か月連続して割り当てる
- (9) 1人の研修医につき、麻酔科と救命救急科はなるべく4か月連続して割り当てる
- (10) 各診療科の各月の定員数を上下限値で指定する
- (11), (12), (13), (14) バイナリ制約

3.3 計算機実験とシステムの構築

愛知医科大学病院の実際のデータをもとに、最適化ソフトウェア IBM ILOG CPLEX を用いて、解を求めた。システムは VBA を用いて、Microsoft Excel 上に実装した。実装したシステムの画面を図 2 に示す。

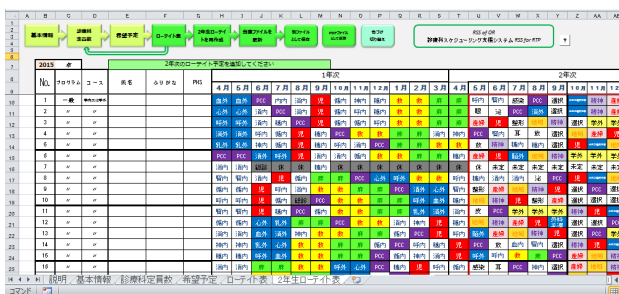


図 2 研修医の診療科ローテーションスケジューリング支援システムのインターフェース

スケジュール作成者は、図 2 に示される画面上部のボタンを順に押すことで操作を行う。システムは、まずもともなるスケジュールを作成し、それを何度も修正しながら最終的なスケジュールを確定できるように設計している。このように、スケジュール作成者が容易に条件の緩和も行え、かつ修正や条件の変更が短時間でできるよ

うにすることで、柔軟なスケジューリングが可能になることが期待できる。

3.4 問題の規模と計算結果

研修医の人数：25人、月数：13か月、診療科：14種類、各定数：任意に設定、とした。以上のデータをもとに計算した結果、変数：7,476、制約式：8,614、計算時間は約40秒だった。ただし、与えるパラメータの値によって計算時間が大幅に変化するため、optimality gap を1%、解を求めるための計算時間を2分に制限している。なお、計算に使用した計算機環境は、CPU：Intel Core i5-2450M、RAM：4.00GB、OS：Microsoft Windows 7である。

4 おわりに

現在、麻酔科医のシフトスケジューリング支援システムや研修医の診療科ローテーションスケジューリング支援システムといった、医療機関におけるスケジューリング支援システムの作成に取り組んでいる。愛知医科大学病院のこれらの問題について定式化を行い、最適化ソフトウェア IBM ILOG CPLEX を用いて解を求め、Excel 上にシステムを構築した。

それぞれのシステムは、スケジュールの修正や条件の変更が容易に行えるように設計した。ここで構築したシステムを使用すれば、現在よりも短時間で条件を満たすスケジュール作成が可能になることが期待できる。さらに、質の高いスケジュールによって研修医の希望を最大限に満たし、研修医教育の効率化につなげることができる。

今後は、それぞれのシステムを利用者に試用してもらい、現在の手作業によるスケジュールと大きく異なる点はないか、システムで作成したスケジュールに不都合がないかを確認していく。そして、そこから得られた知見をもとに、実用に向けて更に改善を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 勝田綾奈, 中村衣里, 「麻酔科医のシフトスケジューリングについて」, 南山大学情報理工学部情報システム数理学科卒業論文 (2014).
- [2] 大西愛乃, 鈴木敦夫, 藤原祥裕, 『麻酔科医の当番・当直勤務スケジューリング支援システムの試作』. 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2015 年春季研究発表会予稿集, pp.88-89, 2015.
- [3] Onishi A., Suzuki A., Ito M., Imamura A. and Ito T. : “Scheduling System for the Resident Training Program in Aichi Medical University Hospital,” *INFORMS Philadelphia-2015*, pp.107, 2015.
- [4] 鈴木敦夫, 今泉隆徳, 藤原祥裕, 『医療機関のスケジューリング問題の事例紹介 -手術室のスケジューリング』. スケジューリング・シンポジウム 2012 講演論文集, pp.151-154, 2012.
- [5] 鈴木敦夫, 藤原祥裕, 『手術室のスケジューリング支援システムについて』. 公益社団法人日本オペレーションズ・リサーチ学会, 経営の科学, Vo. 58, No. 9, pp.515-523, 2013.