

手術室スケジューリング支援システムの試作

M2011MM024 今泉隆徳

指導教員：鈴木敦夫

1 はじめに

本研究は、愛知医科大学病院との共同研究である。現在、愛知医科大学病院では様々なスケジューリング作成を担当者が手作業で行っている。手作業であるがため、手間や時間がかかること、希望がそぐわないこと、無駄が生じているといった可能性がある。更に、公平性にも欠けている可能性がある。本研究では、スケジューリング支援システムを作成し、実際のスケジューリングの現場に導入してもらい、スケジューリングの負担を軽減することを最終目標とする。

現在、病院をはじめとする医療機関では、その部局ごとにオペレーションズ・リサーチの手法であるスケジューリング問題を利用して解決できる問題が数多く存在する。それらの問題は、病院全体のシステムの機能を用いて解決するよりは、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、スケジューリング等の支援システムが病院全体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、それらの機能は使われていない。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などの理由からである。したがって、これらのスケジューリング問題は手作業で行われ、長時間の作業を担当者に強いている。

スケジューリングシステムの実現にあたっては、医療現場での要望をできる限り取り入れる必要がある。そのためには、スケジューリング作成者が必要な修正を適切に行うことができる、対話型なシステムが必要だと考える。そこで、一回の計算で解を求めるのではなく、得られた解や条件を何回か修正しながら、最終的な解を求めるような対話的なアプローチを提案する。このようなアプローチを用いることで、現場の要望を反映することができ、受け入れやすくなると考える。

医療現場の改善に関する研究については、本大学でも過去に2年にわたりナース・スケジューリングに関する問題に取り組んでいる[1, 2]。それらの研究では、看護師のスケジューリングに対する自動化システムの構築をしているが、実際の現場に受け入れてもらうことができなかった。原因として、まず、一度の定式化ですべての制約を満たす解を求めるような定式化を行い、問題が複雑になり大規模になってしまったことがあげられる。更に、スケジュール作成者の経験や相性などを結果に反映できなかったことがあげられる。解決策として、一度の解を求めるのではなく、得られた解や条件を何回も修正しながら最終的な解を求める必要があると考える。

本研究では、愛知医科大学病院における手術室のスケジューリング、麻酔科当直勤務のスケジューリングに取り組んでいる。これらの問題は、実際病院でスケジュールを作成している医師、看護師との共同開発であり、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[3, 4]。また、現在は、当直勤務のスケジューリングに関しては麻酔科を対象としているが、実際には全ての診療科に適用が可能であるといえる。

2 問題解決の考え方

本研究では、手術室のスケジューリングと当直勤務のスケジューリングの支援システムを作成する。そして、実際の現場に導入してもらい、スケジューリングの負担を軽減することが目的である。

従来、スケジューリング問題に対しては、すべての制約を一度で満たすような定式化が行われることが多かったが、このアプローチは、開発コストと使い勝手の面で適切ではないと考えられる。前節でも述べたナース・スケジューリングのシステムも一度で解を求めるような定式化を行っていた。しかし、このようなアプローチでは、開発コストの増加や使い勝手、更に、スケジュール作成者の経験や相性が反映されないなどといった面で適切ではないと考えられる。多くのスケジューリング問題では、現場で非常にきめ細かな配慮があり、そのすべてを定式化するの是非常に困難である。また、すべての制約を満たすような定式化をし、システム構築にいたっても、複雑な制約を実現するために問題が複雑になり大規模になってしまう。そして、解を得るのに長い計算時間がかかってしまう。実際の現場では、一度得られたスケジュールを何回も修正しながら最終的なスケジュールを決定することが多い。このような利用方法を考えると、従来のアプローチは適切ではないと考える。

そこで本研究では、まず、基本となるスケジュールを導き、条件や解を何回も修正可能とするような対話的なアプローチを採用する。具体的には、一回の計算で全ての解を得るのではなく、作成者による修正を可能とするようなスケジューリング支援システムを作成する。このようなアプローチでは、システムの導入が容易になり、担当者が利用する際の使い勝手が向上する。また、スケジュール作成者の経験を活かせるスケジューリングが可能となるため、システム導入への抵抗も少なくなる。[5]によると、このようなアプローチを採用したスケジューリングの自動化システムは現場で受け入れられている。実際、愛知医科大学病院における手術室スケジューリングの担当者も、このようなシステムは実際的であると評価している。

3 問題解決の方法

本節では、スケジューリング作成者による修正を可能とするシステムについて、現在試作中の当直勤務スケジューリングのシステムを例に説明する。

- (1) 各日の各当直勤務に、あらかじめ割り当てたい医師がいる場合や、医師毎に休みを希望する日がある場合は入力する。この際、同時に前月からの引き継ぎ

を考慮する。なお、条件によっては必要な勤務にすべての割り当てができない可能性もある。

- (2) (1) で入力した日の当直勤務には医師を必ず割り当て、休みを希望した日には当直勤務を割り当てないようにする。そして、その他の箇所に医師を割り当てるような、基本となるスケジュールを作成する。
- (3) 作成したスケジュールにおいて、納得のいかない箇所や、割り当てができなかった箇所を再度割り当てるために、その他の箇所を固定させ再びスケジュールを作成する。必要であるならば、一部の条件を変更することも可能である。また、得られたスケジュールの一部を修正して固定させることもできる。
- (4) スケジューリング作成者が受け入れ可能なスケジュールが得られるまで (3) を繰り返し、最終的なスケジュールを作成する。

このような修正を可能とし、何回も解きなおすことができるシステムにより、スケジュールリング作成者の納得のいくスケジュールができるを考える。

4 定式化にあたり

本節では、手術室スケジュールリングと当直勤務スケジュールリングの2種類の定式化を示す。

定式化においては、あらかじめ割り当てを固定させるための定数、制約条件を設けている。計算により割り当てを求めるのではなく、あらかじめ割り当てが決まっているもの、あるいは修正を行う際に割り当てを固定させたい箇所のために用いる。

4.1 手術室スケジュールリングの定式化

本定式化では、ダミーの手術室を設け、ダミーの手術室に割り当てられる手術数を最小化する。つまり、割り当てられる手術数を最大化することを目的とする。なお、定式化は0-1整数計画法の問題として定式化する。

4.1.1 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。

添え字集合

O : 手術の集合 $j \in O$

T : 時間(期)の集合 $t \in T = \{1, 2, \dots, T\}$

(時間を30分単位など、離散的に与える)

R : 手術室の集合 $r \in R = \{1, 2, \dots, m, m+1\}$

($m+1$ はダミーの手術室をあらわす)

D : 診療科の集合 $d \in D$

S : 執刀医の集合 $s \in S$

P : 患者の集合 $p \in P$

I : 使用機器の集合 $i \in I$

定数

n_j : 手術 j の所要時間

u_i : 使用機器 i の同時刻における使用上限

$$a_{jt} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ を時刻 } t \text{ において手術可能} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$b_{jr} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ が手術室 } r \text{ において手術可能} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$c_{jd} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ が診療科 } d \text{ に属する} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$e_{js} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ を執刀医 } s \text{ が執刀する} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$g_{jp} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ の患者が } p \text{ である} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$h_{ji} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ において機器 } i \text{ を使用する} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$f_j = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ を必ず行う} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

決定変数

$$x_{jrt} = \begin{cases} 1 \cdots \text{手術 } j \text{ を手術室 } r \text{ で時刻 } t \text{ から開始} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

4.1.2 定式化

目的関数

$$\min \sum_{j \in O} \sum_{t=1}^{T-n_j+1} x_{j,m+1,t} \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{j \in O} \sum_{t'=\max\{t-n_j+1,1\}}^{\min\{t,T-n_j+1\}} x_{jrt'} \leq 1, \quad t \in T, r \in R \setminus \{m+1\} \quad (2)$$

$$n_j x_{jrt} \leq \left\{ \sum_{t'=t}^{t+n_j-1} a_{jt'} \right\} x_{jrt}, \quad j \in O, r \in R, t = 1, \dots, T - n_j + 1 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in O} \sum_{r \in R \setminus \{m+1\}} \sum_{t'=\max\{t-n_j+1,1\}}^{\min\{t,T-n_j+1\}} e_{js} x_{jrt'} \leq 1, \quad s \in S, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{j \in O} \sum_{r \in R \setminus \{m+1\}} \sum_{t'=\max\{t-n_j+1,1\}}^{\min\{t,T-n_j+1\}} g_{jp} x_{jrt'} \leq 1, \quad p \in P, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{j \in O} \sum_{r \in R \setminus \{m+1\}} \sum_{t'=\max\{t-n_j+1,1\}}^{\min\{t,T-n_j+1\}} h_{ji} x_{jrt'} \leq u_i, \quad i \in I, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} x_{jrt} \leq b_{jr}, \quad j \in O, r \in R \quad (7)$$

$$\sum_{r \in R \setminus \{m+1\}} \sum_{t=1}^{T-n_j+1} x_{jrt} \geq f_j, \quad j \in O \quad (8)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{t=1}^{T-n_j+1} x_{jrt} = 1, \quad j \in O \quad (9)$$

$$x_{jrt} \in \{0, 1\}, \quad j \in O, \quad r \in R, \quad t = 1, \dots, T - n_j + 1 \quad (10)$$

式の説明

- (1) ダミーの手術室に割り当てる手術数を最小化する.
- (2) 同時刻に, ダミーの手術室を除く各手術室に割り当てることができる手術はたかだか1つまで.
- (3) 手術可能な時刻のみに手術を割り当てる.
- (4) 同時刻において各執刀医が行うことができる手術はたかだか1つまで.
- (5) 同時刻において1人の患者に複数の手術を行わない.
- (6) 同時刻において使用できる機器数を上限以下とする.
- (7) 手術可能な手術室のみに手術を割り当てる.
- (8) 指定した手術を必ず行う. (必ず割り当てたい手術や, 修正を行う際に固定をさせたい箇所を用いる)
- (9) すべての手術を必ず1回割り当てる.
- (10) バイナリ制約.

4.2 当直勤務スケジュールリングの定式化

当直勤務スケジュールリングの定式化については, ダミーの医師とダミーのランクを設け, ダミーの医師が行う当直勤務の総和を最小化させる. また, 医師毎の当直勤務回数には上下限値を設けるが, 上下限値を緩和させるための変数を設ける. そして, これらの変数の総和も最小化させる. なお, 定式化は混合整数 (0-1) 計画法の問題として定式化する.

4.2.1 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.

添え字集合

D : 医師全体の集合 $d \in D$

D_1 : ダミーの医師を除いた医師の集合

R : 医師のランクの集合 $r \in R = \{1, 2, 3, 4\}$

$r = 1$: ランク 1

$r = 2$: ランク 2

$r = 3$: ランク 3

$r = 4$: ダミーの医師が属するランク

G_r : $\{i | i \text{ はグループ } r \text{ に属する医師}\}$ $r \in R$

T : 日にちの集合 $t \in T = \{1, 2, \dots, T\}$

S : 当直勤務種類の集合 $s \in S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$

$s = 1$: SICU 当直

$s = 2$: 麻酔科当直

$s = 3$: 麻酔科当直 2

$s = 4$: 居残り 1/待機

$s = 5$: 居残り 2

$s = 6$: 居残り 3

定数

$$p_d = \begin{cases} 1 \cdots \text{医師 } d \text{ は当直勤務が可能である} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$a_{ts} = \begin{cases} 1 \cdots \text{日にち } t \text{ に当直勤務 } s \text{ を割り当てる} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$b_{dt} = \begin{cases} 1 \cdots \text{医師 } d \text{ が日にち } t \text{ に麻酔科当番である} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$c_{dt} = \begin{cases} 1 \cdots \text{医師 } d \text{ が日にち } t \text{ に SICU 当番である} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$f_{dt} = \begin{cases} 1 \cdots \text{医師 } d \text{ が日にち } t \text{ に休みを希望する} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$g_{dt} = \begin{cases} 1 \cdots \text{医師 } d \text{ が日にち } t \text{ に当直勤務を行う} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$h_{rs} = \begin{cases} 1 \cdots \text{ランク } r \text{ の医師が当直勤務 } s \text{ を} \\ \text{行うことができる} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

$$e_{dts} = \begin{cases} 1 \cdots \text{医師 } d \text{ の日にち } t \text{ における} \\ \text{当直勤務 } s \text{ を固定させる} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

l_{ds}^{\pm} : 1 か月あたりの医師 d の当直勤務 s における回数の上下限値

m_s : 当直勤務 s を行ったあと, 次に同じ当直勤務 s を行うまでに挟む休みの最低日にち数

n : いずれかの当直勤務を行ったあと, 次にいずれかの当直勤務を行うまでに挟む休みの最低日にち数

決定変数

$$x_{dts} = \begin{cases} 1 \cdots \text{医師 } d \text{ が日にち } t \text{ に当直勤務 } s \text{ を行う} \\ 0 \cdots \text{その他の場合} \end{cases}$$

y_{ds}^{\pm} : 医師 d における当直勤務 s における回数の上下限値 (l_{ds}^{\pm}) の緩和のための変数

u_{ds}, v_d : 医師 d における, 休み日数 (m_s, n) の緩和のための変数

4.2.2 定式化

目的関数

$$\max \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (b_{dt} x_{d,t,1} + c_{dt} x_{d,t,1}) - \sum_{d \in G_4} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} x_{dts} - \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} (y_{ds}^{\pm} + u_{ds} + v_d) \quad (11)$$

制約条件

$$\sum_{s \in S} x_{dts} \leq 1, \quad d \in D, \quad t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{d \in D} x_{dts} = a_{ts}, \quad t \in T, \quad s \in S \quad (13)$$

$$\sum_{s \in S} x_{dts} \leq p_d, \quad d \in D, \quad t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{t'=t}^{t+m_s} x_{dt's} \leq 1 + u_{ds}, \quad (15)$$

$$d \in D_1, \quad s \in S, \quad t = 1, \dots, T - m_s$$

$$\sum_{t'=t}^{t+n} \sum_{s \in S} x_{dt's} \leq 1 + v_d, \quad (16)$$

$$d \in D_1, \quad t = 1, \dots, T - n$$

$$l_{ds}^- - y_{ds}^- \leq \sum_{t \in T} x_{dts} \leq l_{ds}^+ + y_{ds}^+, \quad (17)$$

$$d \in D_1, \quad s \in S$$

$$\sum_{d \in G_r} x_{dts} = h_{rs}, \quad r \in R, \quad t \in T, \quad s \in S \quad (18)$$

$$\sum_{s \in S} x_{dts} \leq 1 - f_{dt}, \quad d \in D_1, \quad t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{s \in S} x_{dts} \geq g_{dt}, \quad d \in D_1, \quad t \in T \quad (20)$$

$$x_{dts} \geq e_{dts}, \quad d \in D, \quad t \in T, \quad s \in S \quad (21)$$

$$x_{dts} \in \{0, 1\}, \quad d \in D, \quad t \in T, \quad s \in S \quad (22)$$

$$y_{ds}^-, y_{ds}^+ \geq 0, \quad d \in D, \quad s \in S \quad (23)$$

式の説明

- (11) 麻酔科当番を行った医師または SICU 当番を行った医師が SICU 当直勤務を行う回数を最大化し、ダミーの医師が行う当直勤務回数を最小化し、緩和のための変数を最小化する。
- (12) 1 人の医師が 1 日に行うことのできる当直勤務はたかだか 1 つまで。
- (13) 各当直勤務を必要な日にちに割り当てる。
- (14) 当直勤務が可能な医師しか当直勤務を行わない。
- (15) 各当直勤務において、指定の休み日数を挟む。
- (16) 当直勤務全体において、指定の休み日数を挟む。
- (17) 当直勤務回数を上下限で指定する。
- (18) それぞれの当直勤務に決められたランクの医師のみを割り当てる。
- (19) 休みを希望した日には当直勤務を行わない。
- (20) 希望した日に当直勤務を行う。
- (21) 割り当てを固定させる。(月をまたぐ際の引き継ぎの考慮、あらかじめ割り当てを固定させたい際や、修正を行う際に固定させたい箇所を用いる。)
- (22) バイナリ制約。
- (22) 非負制約。

5 システムの評価

手術室スケジューリングと当直勤務スケジューリングを、愛知医科大学病院の現実を模したデータのもと計算をした結果の一例を示す。それぞれの問題の規模と 1 回の計算にかかる計算時間を示す。

なお、計算に使用した計算機環境は次の通りである。OS: Microsoft¹ Windows 7¹, CPU: Intel² Core²i5-2320 3.00GHz, RAM: 4.00GB. また、計算に使用した最適化ソフトウェアは、IBM³ ILOG³ CPLEX³ Optimization Studio 12.4 である。更に、システムは VBA¹を用いて、Microsoft Excel¹ 上に実装する。

5.1 手術室スケジューリング

手術数 (J): 5 日分である 150, 時間 (T): 8 時 30 分から 17 時までの 30 分を一区切り, 手術室 (R): ダミー 1 室を含む 13 室, 診療科数: 35, その他の集合, 定数に関しては任意に設定した。

以上のデータのもとに計算した結果, 175,501 変数, 155,742 制約式で, 計算時間は 2.64 秒だった。ただし, 実行から結果の表示までに 50 秒程度かかった。

5.2 当直勤務スケジューリング

医師の人数 (D): ダミーの医師 5 人を含む 30 人, ランク (R): ダミーの 1 つを含む 4 つ, 日にち (T): 1 か月, 当直勤務数 (S): 6 種類, 各定数: 任意に設定, とした。

以上のデータのもとに計算した結果, 6,120 バイナリ変数, 301 実数変数, 15,875 制約式で, 計算時間が 0.65 秒だった。結果の表示までを含めると数秒程度かかった。

6 おわりに

本研究では、愛知医科大学病院の手術室スケジューリング、当直勤務スケジューリングの支援システムの作成に取り組んでいる。なお、現段階では、愛知医科大学病院の実際のスケジューリングの現場で試作段階のシステムを使用してもらえるか調整中である。具体的には、スケジューリング作成者に試用してもらっており、現在の手作業での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満が出ないかを確認している。そして、今後も、担当者 と 入念な打ち合わせを行い、更に実用に向け改善を行う予定である。

参考文献

- [1] 青野愛: 病棟看護師勤務シフトの自動作成に関する実際研究. 南山大学大学院数理情報研究科 2008 年度修士論文, 2009.
- [2] 伊東尚美: 実用的なシフトスケジューリングシステムの試作. 南山大学大学院数理情報研究科 2009 年度修士論文, 2010.
- [3] 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.
- [4] 鈴木敦夫, 今泉隆徳, 藤原祥裕: 医療機関におけるスケジューリング問題の実際的解決方法. 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2012 年秋季研究発表会, 2-A-11, pp.148-149, 2012.
- [5] 鈴木敦夫: ホームセンターのサービスイノベーション -最適店舗レイアウトとシフト作成. オペレーションズ・リサーチ, Vol.56, No.8, pp.439-444, 2011.

¹Microsoft, Windows 7, Excel, VBA は、米国 Microsoft Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。

²Intel, Core は、Intel Corporation または子会社の米国およびその他の国における商標または登録商標です。

³IBM, ILOG, CPLEX は IBM Corporation の米国およびその他の国における登録商標です。