

公平性を考慮した麻酔科医スケジューリング問題に関する一検討

A Study on Egalitarianism in Anesthesiologist Scheduling Problem

山中 悠介¹ 沖本 天太² 平山 勝敏²

神戸大学海事科学部¹ 神戸大学大学院海事科学研究科²

1 序論

24 時間体制で人命を守る医療機関において、医療スタッフが無理なく働けるような勤務シフトの作成や、効率的な手術室の管理運営を考えることは重要である。医療機関におけるスケジューリング問題、例えば、ナース・スケジューリング (Nurse Scheduling Problem, NSP) [1, 3], 麻酔科医スケジューリング (Anesthesiologist Scheduling Problem, ASP) [5, 6], 手術室スケジューリング (Operating Room Scheduling, ORS) [2, 4] 等はオペレーションズ・リサーチにおける基本的な枠組みである。

ASP とは、麻酔科医、勤務日、麻酔科医のランク、当直勤務等の集合に対して、与えられた制約条件(例えば、麻酔科医は各日、各当直シフトに高々 1 回しか割当ててはならないや、当直勤務が必要な日には必ず医師を割当てなければならない等)を満たすように勤務シフトを作成する組合せ最適化問題である。

本論文では、ASP における新しい解の評価基準として、勤務割当に対する麻酔科医間の“平等性”を定義する。ASP では、与えられた制約条件下で、昼間の勤務と夜間の当直勤務に割当てられる麻酔科医数が最大化されるように勤務シフトを作成することを目的としている。これは昼夜の連続勤務を希望する麻酔科医が多いためであるが、このとき、偏った勤務割当(ある麻酔科医のみに連続勤務が集中している等)はなるべく避ける必要がある。NSP や ORS に関する既存研究は数多く存在するが、ASP に関する研究は少なく、“最適性”と“平等性”を同時に考慮した研究は、著者らが知る限り、ほとんど存在しない。

2 麻酔科医スケジューリング問題

麻酔科医スケジューリング (Anesthesiologist Scheduling Problem, ASP) [5, 6] の概要を紹介し、ASP における麻酔科医間の“平等性”を定義する。ASP とは、与えられた制約条件を満たすように麻酔科医の勤務シフトを作成する組合せ最適化問題である。以下に、文献 [6] で紹介されている ASP を示す。ASP では、麻酔科医(医師)の集合 D 、ダミーを除いた医師の集合 D_1 、医師のランクの集合 $R = \{1, 2, 3, 4\}$ 、ランク $r \in R$ に属する医師の集合 G_r 、勤務期間内の日付の集合 $T = \{1, \dots, m\}$ 、当直勤務の集合 $S = \{1, \dots, 6\}$ がそれぞれ与えられている。

次に、制約条件を示す。文献 [6] では、12 個の制約条件が紹介されているが、紙面の都合上、ここでは代表的なものを示す。

制約 1: 医師は各日、各当直シフトに高々 1 回しか入れない。

変数 $x_{dts} \in \{0, 1\}$ は医師 d が t 日に当直勤務 s をする場合 1、それ以外は 0 となる。

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

制約 2: 当直勤務が必要な日には必ず医師を割当てる。定数 a_{ts} は t 日に当直勤務 s を割当てる場合 1、それ以外は 0 となる。

$$\sum_{d \in D} x_{dts} = a_{ts}, \quad t \in T, \quad s \in S \quad (2)$$

制約 3: 当直勤務可能な医師のみを割当てる。定数 p_d は医師 d が当直勤務可能である場合 1、それ以外は 0 となる。

$$\sum_{s \in S} x_{dts} \leq p_d, \quad d \in D, \quad t \in T \quad (3)$$

制約 4: ある医師がある当直を行う回数は、あらかじめ定められた上限 l_{ds}^+ と下限 l_{ds}^- の間になくってはならない。ただし、上限を上回る場合と下限を下回る場合も認め、その回数はそれぞれ l_{ds}^+ と l_{ds}^- の緩和のための変数 y_{ds}^+ と y_{ds}^- に蓄えられる。

$$l_{ds}^- - y_{ds}^- \leq \sum_{t \in T} x_{dts} \leq l_{ds}^+ + y_{ds}^+, \quad d \in D_1, \quad s \in S \quad (4)$$

制約 5: 医師はランク r ごとに定められた当直を行う。定数 h_{rs} は r の医師が s を勤務可能である場合 1、それ以外は 0 となる。

$$\sum_{d \in G_r} x_{dts} = h_{rs}, \quad r \in R, \quad t \in T, \quad s \in S \quad (5)$$

目的関数は以下の式で与えられる。定数 $b_{dt} \in \{0, 1\}$ は医師 d が t 日の昼間に麻酔科当番を行う場合は 1 となる。定数 $c_{dt} \in \{0, 1\}$ は医師 d が t 日の昼間に SICU (手術後、患者の容態が安定するまで滞在する部屋) 当番を行う場合は 1 となる。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (b_{dt} x_{dt1} + c_{dt} x_{dt1}) - \sum_{d \in G_4} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} x_{dts} \\ & - \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} (y_{ds}^- + y_{ds}^+) - \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} (u_{ds} + v_d) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、変数 u_{ds} 及び v_d は、医師 d が前月のスケジュールを考慮した最初の当直勤務 s を行った後、次に同じ当直勤務 s を行うまでの休みの最低日数を緩和した変数及び、次にいずれかの当直勤務を行うまでの休みの最低日数を緩和した変数を表す。

定義 1 (最適性). ASP において, 式 (6) の目的関数を最大化するような解, すなわち, 昼夜の連続勤務が割当てられる麻酔科医数が増大されるような勤務シフトを最適解と呼ぶ.

各麻酔科医 $d_i \in D$ の昼夜連続勤務数を z_{d_i} とし, すべての麻酔科医の昼夜連続勤務数を z -ベクトルと呼び, $z = (z_{d_1}, \dots, z_{d_n})$ と記述する. また 2 つの z -ベクトル, $z = (z_{d_1}, \dots, z_{d_n})$ 及び $z' = (z'_{d_1}, \dots, z'_{d_n})$ に関して, 両者の昼夜連続勤務数の総和が等しい, すなわち, $\sum_{d_i \in D} z_{d_i} = \sum_{d_i \in D} z'_{d_i}$ が成立するとき, z と z' は同等であるという. 同等な z -ベクトルからなる集合を Z と記述する. また Z 上の前順序は \preceq_{lex} により与えられるものとする, すなわち, $\forall z, z' \in Z$ に関して, z が辞書式順序において z' より先行している, またそのときに限り, $z \preceq_{lex} z'$ と定義する. 例えば, 5 人の麻酔科医の昼夜連続勤務数に関する同等な z -ベクトル, $z = (7, 2, 1, 1, 1)$ 及び $z' = (5, 1, 3, 1, 2)$ において, 要素が小さい順に並び替えると z は $(1, 1, 1, 2, 7)$, z' は $(1, 1, 2, 3, 5)$ となる. ここで, 並び替えられた z 及び z' の第 1 項の要素から両者を比較していく. 第 1 項及び第 2 項の要素 1 は両ベクトルとも等しいため, 第 3 項の要素を比較する. z の 1 は z' の 2 より小さい. したがって, $z \preceq_{lex} z'$ が成立する.

定義 2 (平等性). ASP の解集合 (最適解の集合) を A とする. また, ある解 $a \in A$ の z -ベクトルを z とする. このとき, 解 a が平等であるとは, $z \preceq_{lex} z'$ となるような z と同等な z -ベクトル z' をもつ他の解 $a' \in A$ が存在しないことを意味する.

3 解法と評価

本章では, 解法の概要を示し, 文献 [6] のデータを用いて, 最適かつ, 平等な勤務シフトを作成する. 本解法では, まず ASP の最適解を求める. ここで, 最適解によって得られる最適値を z^* と記述する. 次に, 元の制約条件に以下を新しく追加する.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (b_{dt}x_{dt1} + c_{ct}x_{dt1}) = z^* \quad (7)$$

最後に, 目的関数を以下のように変更し, 与えられた ASP に対して, ϵ が最大化されるような解, すなわち, 追加された制約条件下で得られた最適解の中から, 平等な解を求める.

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} (b_{dt}x_{dt1} + c_{ct}x_{dt1}) \geq \epsilon \quad (8)$$

実験では, 文献 [6] と同じ問題設定で, 従来手法と提案手法を用いて SICU 勤務を行えるランク 1 の麻酔科医の昼夜連続勤務数を調べた. 具体的には, 麻酔科医数 22 名 (ランク 1 の麻酔科医が 8 名, ランク 2 から 6 の麻酔科医が 14 名) とし, 1 ヶ月分の勤務シフトを CPLEX_Studio127 を用いて求めた. 表 1 に実験結果を示す. ランク 1 の麻酔科医 8 名の昼夜連続勤務数は両手法共に 24 (最適値) であるが, その詳細 (各麻酔科医の勤務数) を調べると, 提案手法では, 麻酔科医間に偏りがなく, より平等な勤務シフトを作成している. さらに, 表 2 に麻酔科医数を 30 (ランク 1 の麻酔科医が 10 名) としたときの実験結果を示す. ここでも, 従来手法と提案手法におけるランク 1 の

表 1 麻酔科医数 22 名の問題における, 従来手法と提案手法を用いて求めたランク 1 の麻酔科医 8 名の昼夜連続勤務数.

麻酔科医	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
従来手法	7	3	/	6	4	/	1	3
提案手法	4	4	/	4	4	/	4	4

表 2 麻酔科医数 30 名の問題における, 従来手法と提案手法を用いて求めたランク 1 の麻酔科医 10 名の昼夜連続勤務数.

麻酔科医	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
従来手法	5	3	/	0	3	/	4	3	6	/
提案手法	3	4	/	4	3	/	4	3	3	/

麻酔科医 10 名の昼夜連続勤務数は同じ 24 であるが, 提案手法では, 従来手法と比べ, 麻酔科医間の昼夜連続勤務数の偏りが少なく, より平等な勤務シフトを作成しているのがわかる. 以上より, 提案手法では, 従来の最適性に加え, 麻酔科医間の平等性を考慮した勤務シフトが作成可能であることがわかった.

4 結言

麻酔科医スケジューリング (ASP) とは, 麻酔科医, 勤務日, 麻酔科医のランク, 当直勤務等の集合に対して, 与えられた制約条件を満たすように勤務シフトを作成する組合せ最適化問題である. 本論文では, ASP における新しい解の評価基準として, 勤務割当に対する麻酔科医間の“平等性”を定義した. さらに, 与えられた制約条件下で, 昼夜連続勤務数が最大化されるような最適かつ, 平等な勤務シフトを作成する解法を提案した. 実験では, 先行研究 [6] と同じ問題設定で, 麻酔科医にとって最適かつ, 平等な勤務シフトを作成した. 今後の課題として, 最適性及び, 平等性を同時に考慮した他の医療機関におけるスケジューリング問題への適用等が挙げられる. その他にも, 麻酔科医の急な欠勤等を考慮したロバスタな ASP の定式化がある.

謝辞: 本研究の遂行にあたり, 高橋産業経済研究財団 (整理番号: 公財 07-003-105) の平成 29 年度研究助成を受けました. ここに深く感謝致します.

参考文献

- [1] E. Burke, P. Causmaecker, G. Berghe, and H. Landeghem. The State of the Art of Nurse Rostering. *J. Scheduling*, 7(6):441–499, 2004.
- [2] P. Stepaniak, R. van der Velden, J. van de Klundert, and A. Wagelmans. Human and artificial scheduling system for operating rooms. *Handbook of Healthcare System Scheduling*, pages 155–175, 2012.
- [3] 池上敦子. ナース・スケジューリング調査・モデル化・アルゴリズム. *統計数理*, 53(2):231–259, 2005.
- [4] 繁野麻衣子 and 松岡博. 手術室のスケジューリング. *オペレーションズ・リサーチ*, 58(11):628–633, 2013.
- [5] 鈴木敦夫. 周術期医療におけるオペレーションズ・リサーチ. *日臨麻会誌*, 34(5):684–691, 2014.
- [6] 鈴木敦夫 and 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. *オペレーションズ・リサーチ*, 58(9):515–523, 2013.