

患者の症状を考慮したナース・スケジューリング問題 Nurse Scheduling Problem considering Patient Symptoms

吉田 基輝*
Motoki Yoshida

沖本 天太*
Tenda Okimoto

平山 勝敏*
Katsutoshi Hirayama

1. 序論

24 時間体制で人命を守る医療機関において、看護師をはじめとする医療従事者が無理なく働けるような勤務環境を考えることは重要な課題である。ナース・スケジューリング問題 (Nurse Scheduling Problem, NSP) [1, 3, 8] とは、看護師、勤務日、勤務内容等の集合に対して、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り、人工知能及びオペレーションズ・リサーチ分野における代表的な応用問題として広く研究されている。NSP では、例えば、労働基準法に反するような勤務割当てを禁止する制約、日付毎に必要な最低限の看護師数を割当てる制約、看護師の休息时间に関する制約等の満たすべき制約条件が多く、看護師と医療施設の双方にとって理想的な勤務シフトを組むのは非常に困難な問題である。また看護師の勤務シフトは、多くの場合、看護師長が労働時間外に手作業で作成しているため、その負担を軽減する必要もある。これらの問題を解決するため、NSP を解く様々な洗練されたアルゴリズムが開発されている [2, 4, 5]。

医療現場では、看護する側 (看護師) だけでなく、看護される側 (患者) を含めた双方を同時に考慮する必要がある。従来の NSP では、ある一定の医療レベルの提供が可能となるように、各看護師の勤務年数や医療スキルを考慮して勤務シフトが作成されている (例えば、新人はベテラン看護師と勤務し、新人のみの勤務は避ける等)。その他にも、NSP には 7 連続以上の勤務割当ての禁止、看護師の休息時間の確保、看護師の勤務希望等の様々な制約条件が存在するが、これらは全て看護する側を考慮したものであり、看護師の無理のない勤務環境を守ることにより、質の高い医療提供を可能とするためのものである。これに対して、患者側には様々な症状が存在し、その程度や必要とされる医療スキルも様々である。しかし、NSP に関する既存研究では看護する側に着目した研究がほとんどであり、患者の症状に着目した研究は寡聞にして見当たらない。

本論文では、患者の症状を考慮したナース・スケジューリング問題 (Nurse Scheduling Problem considering Patient Symptoms, NSP^{PS}) のフレームワークを紹介する。具体的には、従来の NSP において、看護する側 (看護師) のスケジュールに加え、看護される側 (患者) を同時に考慮した NSP を提案する。まず、ある患者の症状は、ある一定の医療レベルの看護師によって対応可能とする対応可能性に関する制約を定義する。次に NSP^{PS} を 0-1 整数計画問題として定式化する。実験では、最適化ソルバー CPLEX を用いて、患者の症状を考慮した看護師 15 人の 2 週間の NSP^{PS} を求解する。

本論文は序論と結言を含めて全体を 5 章で構成している。次章では、ナース・スケジューリング問題について概説する。3 章では、患者の症状を考慮したナース・スケジューリング問題 (NSP^{PS}) のフレームワークを紹介し、NSP^{PS} を 0-1 整数計画問題として定式化する。4 章では、看護師 15 人の 2 週間の NSP^{PS} を求解する。5 章では、結論と今後の課題について述べる。

2. ナース・スケジューリング

本章では、ナース・スケジューリング問題 (NSP) [1, 3, 8] について概説する。看護師の勤務形態や制約条件は医療施設により様々であるが、本論文では、3 交代制 (日勤、準夜勤、深夜勤) の NSP を対象とする。以下、NSP の基本用語及び、代表的な制約条件を与える [3, 6]。

基本用語

- $N = \{1, \dots, q\}$: 看護師の集合。
- $D = \{1, \dots, r\}$: 勤務期間内の日付の集合。
- $X = \{x_{11}, \dots, x_{qr}\}$: 変数の集合。
- $W = \{o, m, e, n\}$: 変数値の集合。o は休み, m は日勤, e は準夜勤, n は深夜勤をそれぞれ表す。
- $L = \{l_1, \dots, l_5\}$: 看護師のスキルレベルの集合。l₁ が最も高く, l₁ は婦長, l₅ は新人看護師を表す。
- C : 制約の集合。C_h をハード制約, C_s をソフト制約の集合とし, $C = C_h \cup C_s$ は和集合を表す。
- $\mu: N \rightarrow L$: 各看護師のスキルレベルを返す写像。

制約条件 †

制約 1: 労働基準法に反するような勤務を割当ててはならない。例えば、各看護師に対して、7 連続以上の勤務割当てや、3 連続以上の深夜勤割当て等。

制約 2: 日付毎に必要な最低限の看護師数を割当てなければならない。例えば、日付毎の看護師の必要最低限数が日勤 3 名、準夜勤 2 名、深夜勤 1 名以上等。

制約 3: 新人看護師はベテラン看護師と働かなければならない。例えば、新人のみの勤務は避ける等。

制約 4: 現在の勤務シフトから次の勤務シフトまで最低 16 時間の休息時間を確保しなければならない。

†制約 1 から 4 はハード制約と呼ばれる絶対に満たさなければならない制約である。一方、制約 5 はソフト制約と呼ばれるハード制約を緩和した制約であり、なるべく満たすのが望ましい制約である。

*神戸大学大学院海事科学研究科

表 1: 7 人の看護師の 1 週間の勤務シフトの例.

看護師 (レベル)	月	火	水	木	金	土	日
1 (l_1)	<i>o</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>e</i>
2 (l_2)	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>o</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>
3 (l_3)	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>o</i>
4 (l_3)	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>o</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
5 (l_4)	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>e</i>	<i>n</i>	<i>o</i>	<i>m</i>
6 (l_4)	<i>n</i>	<i>n</i>	<i>o</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>e</i>	<i>e</i>
7 (l_5)	<i>e</i>	<i>o</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>

制約 5: 各看護師が提出する勤務希望 (休暇) をなるべく満たすように勤務を割当てなければならない.

定義 1 (NSP). ナース・スケジューリング問題 (NSP) は, X を変数の集合, W を変数値の集合, L を看護師のスキルレベルの集合, C を制約の集合, μ を各看護師のスキルレベルを返す写像, ϕ を目的関数とし,

$$\langle X, W, L, C, \mu, \phi \rangle \quad (1)$$

のような組により定義される. ここで, 全変数への割当てを A とし, 目的関数 ϕ は,

$$\phi(A, c) = \begin{cases} 0 & c \in C_h \text{ が } A \text{ により充足可能,} \\ \infty & c \in C_h \text{ が } A \text{ により充足不可,} \\ 1 & c \in C_s \text{ が } A \text{ により充足不可.} \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi(A) = \sum_{c \in C} \phi(A, c) \quad (3)$$

により与えられる. NSP を解くとは, 制約違反数の総和を最小化するような勤務シフトを作成することである.

例 1 (NSP). 7 人の看護師 (1, 2, ..., 7) の 1 週間の勤務シフトを考える. 簡単化のため, ここでは, 看護師の勤務希望に関する制約 5 を除く, 制約 1 から制約 4 を対象とする. 表 1 に, 全て制約条件を満たす NSP の解を示す. まず, 各看護師には必ず休み *o* が割当てられているため (例えば, 看護師 1 には月曜日, 看護師 2 には木曜日等), 制約 1 は充足されている. 次に, 各曜日に着目すると, 日勤 *m* に 3 人, 準夜勤 *e* に 2 人, 深夜勤 *n* に 1 人割当てられているため, 制約 2 も充足されているのが分かる. 新人 (スキルレベル l_5) は深夜勤に割当てられていないので制約 3 も充足されている. 最後に, 各看護師について, 任意の連続する 2 勤務日を見ると, 準夜勤 - 日勤, 深夜勤 - 日勤, 深夜勤 - 準夜勤の組合せがないため, 制約 4 も充足されている.

3. 患者の症状を考慮したナース・スケジューリング

従来の NSP では, 看護師のスキルレベルは勤続年数や医療資格等に応じて分けられており, ある一定水準の看護医療提供が可能となるような勤務シフトの作成に用いられている. しかし, 看護される患者側に着目すると, 患者には様々な症状が存在し, その程度や必要な看護スキルは異なる. 本章では, 患者の症状を考慮したナース・スケジューリング問題 (NSP^{PS}) を紹介する. また NSP^{PS} を 0-1 整数計画問題として定式化する.

はじめに, NSP^{PS} のフレームワークを定義する. NSP に関して, $P = \{p_1, \dots, p_t\}$ を患者の集合とし, $\sigma: P \rightarrow L$ を患者から看護師のスキルレベルを返す写像とする.

定義 2 (NSP^{PS}). 患者の症状を考慮したナース・スケジューリング問題 (NSP^{PS}) は, X を変数の集合, W を変数値の集合, L を看護師のスキルレベルの集合, C を制約の集合, P を患者の集合, $\mu: N \rightarrow L$ を各看護師のスキルレベルを返す写像, $\sigma: P \rightarrow L$ を患者から看護師のスキルレベルを返す写像, ϕ を目的関数とし,

$$\langle X, W, L, C, P, \mu, \sigma, \phi \rangle \quad (4)$$

の組により定義される. NSP^{PS} を解くとは, 制約違反数の総和を最小化する勤務シフトを作成することである.

定義 3 (対応可能性). ある患者 $p_k \in P$ ($1 \leq k \leq t$) 及び, ある看護師 i ($1 \leq i \leq q$) に関して,

$$\sigma(p_k) \leq_L \mu(i) \quad (5)$$

が成立するとき, 患者 p_k の症状は看護師 i のスキルレベルによって対応可能であるという. ここで, \leq_L は看護師のスキルレベルに関する全順序関係を表す. また, 看護師 i 及び j ($\mu(j) <_L \mu(i)$) と患者 $p_k \in P$ に関して, $\sigma(p_k) = \mu(j)$ ならば, すなわち, 患者 p_k が看護師 j によって対応可能であるならば, p_k は j よりスキルレベルの高い i によっても対応可能であるとする.

次に, NSP^{PS} を 0-1 整数計画問題として定式化する. 以下に変数, 制約条件, 目的関数をそれぞれ与える.

変数

- 勤務割当て変数 $x_{i,j,w} \in \{0, 1\}$: 看護師 i の j 日における勤務割当てが w である場合は 1, それ以外は 0.
- 休暇希望充足変数 $y_{i,j} \in \{0, 1\}$: 看護師 i の j 日の休暇希望が充足不可の場合は 1, それ以外は 0.

制約条件

制約 1: 労働基準法に反する勤務の禁止制約. 7 連続以上の勤務及び, 3 連続以上の深夜勤割当ての禁止. ここで, j_1, \dots, j_7 は任意の連続する勤務日を表す.

$$\bigwedge_{i \in N} \sum_{(j_1, \dots, j_7)} x_{i,j_1,o} + \dots + x_{i,j_7,o} \geq 1 \quad (6)$$

$$\bigwedge_{i \in N} \sum_{(j_1, j_2, j_3)} x_{i,j_1,n} + x_{i,j_2,n} + x_{i,j_3,n} < 3 \quad (7)$$

制約 2: 日付毎に必要な最低限の看護師数に関する制約 (例: 日勤 6 名, 準夜勤 4 名, 深夜勤 3 名以上).

$$\bigwedge_{j \in D} \sum_{i \in N} x_{i,j,m} \geq 6 \quad (8)$$

$$\bigwedge_{j \in D} \sum_{i \in N} x_{i,j,e} \geq 4 \quad (9)$$

$$\bigwedge_{j \in D} \sum_{i \in N} x_{i,j,n} \geq 3 \quad (10)$$

表 2: 患者 3 人の入院期間が全員同じ 2 週間のときの, 看護師数 15 人の 2 週間の勤務シフト.

勤務シフト	月	火	水	木	金	土	日
日勤	1, 2, 3, 14, 15	2, 3, 5, 8, 15	2, 3, 5, 6, 15	1, 3, 9, 14, 15	1, 4, 9, 10, 15	1, 4, 6, 12, 15	3, 4, 5, 6, 12
準夜勤	4, 10, 11, 12	1, 4, 13, 14	7, 8, 12, 13	7, 8, 12, 13	3, 7, 8, 13	8, 9, 10, 11	2, 8, 9, 11
深夜勤	6, 7, 9	9, 10, 11	4, 10, 11	2, 5, 6	2, 5, 14	7, 13, 14	1, 10, 13
休日	5, 8, 13	6, 7, 12	1, 9, 14	4, 10, 11	6, 11, 12	2, 3, 5	7, 14, 15
勤務シフト	月	火	水	木	金	土	日
日勤	3, 4, 6, 7, 12	1, 3, 7, 8, 13	1, 3, 8, 13, 15	9, 11, 13, 14, 15	3, 6, 9, 11, 12	2, 3, 10, 11, 12	2, 3, 5, 6, 12
準夜勤	2, 5, 14, 15	2, 5, 12, 14	4, 5, 10, 12	1, 4, 5, 8	1, 13, 14, 15	7, 13, 14, 15	9, 11, 14, 15
深夜勤	9, 10, 11	6, 9, 11	2, 6, 7	2, 7, 10	4, 5, 8	1, 4, 8	1, 10, 13
休日	1, 8, 13	4, 10, 15	9, 11, 14	3, 6, 12	2, 7, 10	5, 6, 9	4, 7, 8

制約 3: 新人 (スキルレベル l_5) のみでの深夜勤労働の禁止制約. ここで, $N_{\{l_5\}}$ はスキルレベル l_5 , すなわち, 新人看護師の集合を表し, $N_{\{l_1, l_2\}}$ はスキルレベル l_1 及び l_2 のベテラン看護師の集合を表す.

$$\bigwedge_{i \in N_{\{l_5\}}} \bigwedge_{j \in D} (x_{i,j,n} = 1 \Rightarrow \bigvee_{i' \in N_{\{l_1, l_2\}}} x_{i',j,n} = 1) \quad (11)$$

制約 4: 最低 16 時間の休息確保に関する制約. ここで, j_i と j_{i+1} は任意の連続する勤務日を表す.

$$\bigwedge_{i \in N} x_{i,j_i,e} + x_{i,j_{i+1},m} \leq 1 \quad (12)$$

$$\bigwedge_{i \in N} x_{i,j_i,n} + x_{i,j_{i+1},m} \leq 1 \quad (13)$$

$$\bigwedge_{i \in N} x_{i,j_i,n} + x_{i,j_{i+1},e} \leq 1 \quad (14)$$

制約 5: 各看護師の休暇希望に関する制約. ここで, $z_{i,j,o}$ は看護師 i の j 日に対する休暇希望を表す.

$$\bigwedge_{i \in N} \bigwedge_{j \in D} x_{i,j,o} = z_{i,j,o} \quad (15)$$

制約 6: 対応可能性に関する制約. 各勤務シフトにおいて, ある患者 $p_k \in P$ に対応可能な看護師, すなわち, $\sigma(p_k) \leq L\mu(i)$ が成立するような看護師 $i \in N$ を割当てなければならない. ここで, $N_{(\sigma(p_k) \leq L\mu(i))}$ は患者 p_k に対して対応可能な看護師の集合を表す.

$$\bigwedge_{j \in D} \sum_{i \in N_{(\sigma(p_k) \leq L\mu(i))}} x_{i,j,m} \geq |p_i| \quad (16)$$

$$\bigwedge_{j \in D} \sum_{i \in N_{(\sigma(p_k) \leq L\mu(i))}} x_{i,j,e} \geq |p_i| \quad (17)$$

$$\bigwedge_{j \in D} \sum_{i \in N_{(\sigma(p_k) \leq L\mu(i))}} x_{i,j,n} \geq |p_i| \quad (18)$$

目的関数: 本論文では, 制約 5 のみをソフト制約とし, ソフト制約違反数の総和, すなわち, 勤務シフト作成前に提出される各看護師の休暇希望に関する制約違反数の総和を最小化することを目的とする.

$$\min. \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} y_{i,j} \quad (19)$$

4. 評価実験

本章では, 看護師数 15 人の 2 週間の NSP^{PS} を 0-1 整数計画問題として定式化し, 最適化ソルバー CPLEX を用いて求解した. 実験では, 入院患者全員が 2 週間入院する場合 (実験 1) と, 入院期間が患者によって異なる場合 (実験 2) の NSP^{PS} を求解した. また, 制約条件に関しては, 制約 1 から制約 4 及び, 対応可能性に関する制約 6 をハード制約とし, 看護師の休暇希望に関する制約 5 をソフト制約とした. さらに, 制約 6 に関しては, 患者数を最大 3 人までとし, 各患者に対応可能な看護師を 4 人をランダムに決定した. 最後に, 各看護師の休暇希望は 2 週間内の任意の 2 日をランダムに決定した. 以下に, 実験 1 及び 2 の設定を示す.

- 実験 1: 患者 3 人の入院期間が全員同じ 2 週間としたときの, 看護師数 15 人の 2 週間の NSP^{PS}.
- 実験 2: 患者 3 人の入院期間がそれぞれ異なるときの, 看護師数 15 人の 2 週間の NSP^{PS}.

まず, 実験 1 の NSP^{PS} における制約違反数の総和は 3, 求解時間は 0.30 秒であった. 表 2 に得られた勤務シフトを示す. 本実験において, ランダムに決定された, 各患者に対応可能な看護師 4 人は以下である.

- 1 人目の患者 p_1 に対応可能な看護師: 6, 8, 10, 14,
- 2 人目の患者 p_2 に対応可能な看護師: 1, 5, 7, 11,
- 3 人目の患者 p_3 に対応可能な看護師: 2, 4, 9, 13.

表 2 より, 2 週間内の日勤, 準夜勤, 深夜勤には必ず各患者に対応可能な看護師が割当てられているのが分かる. 例えば, 患者 p_1 に関しては, 対応可能な看護師は 6, 8, 10, 14 であり, 第 1 週目の月曜日に着目すると, 日勤には看護師 14, 準夜勤には看護師 10, 深夜勤には看護師 6 が割当てられている. 同様に, 患者 p_2 に関しては, 対応可能な看護師は 1, 5, 7, 11 であり, 日勤には看護師 1, 準夜勤には看護師 11, 深夜勤には看護師 7 が割当てられている. また患者 p_3 に関しては, 対応可能な看護師は 2, 4, 9, 13 であり, 日勤には看護師 2, 準夜勤には看護師 4, 深夜勤には看護師 9 が割当てられているのが分かる. さらに実験 1 では, 各患者の入院期間は 2 週間なので, 全勤務シフトには必ず各患者に対応可能な看護師が存在する. 例えば, 患者 p_1 に着目し, 各曜日の深夜勤をみると, 第 1 週目の月曜日には

表 3: 患者 3 人の入院期間がそれぞれ異なるときの, 看護師数 15 人の 2 週間の勤務シフト.

勤務シフト	月	火	水	木	金	土	日
日勤	4, 8, 10, 13, 14	1, 4, 6, 10, 14	1, 2, 10, 14, 15	1, 2, 8, 9, 10	1, 4, 8, 9, 14	4, 5, 9, 12, 14	2, 4, 5, 11, 14
準夜勤	3, 7, 11, 15	8, 11, 12, 13	4, 5, 6, 13	6, 7, 13, 15	6, 7, 13, 15	1, 6, 8, 15	3, 9, 12, 15
深夜勤	2, 5, 9	3, 7, 9	3, 11, 12	5, 11, 12	2, 3, 10	7, 10, 13	1, 6, 8
休日	1, 6, 12	2, 5, 15	7, 8, 9	3, 4, 14	5, 11, 12	2, 3, 11	7, 10, 13
勤務シフト	月	火	水	木	金	土	日
日勤	2, 4, 5, 7, 11	1, 2, 6, 7, 8	2, 3, 6, 8, 15	3, 6, 8, 9, 15	6, 8, 11, 13, 15	4, 6, 7, 8, 13	4, 6, 8, 12, 13
準夜勤	10, 13, 14, 15	4, 5, 10, 14	1, 7, 10, 12	1, 4, 10, 14	1, 2, 9, 14	2, 5, 11, 14	3, 11, 14, 15
深夜勤	3, 9, 12	9, 11, 13	5, 11, 13	5, 7, 12	3, 10, 12	1, 9, 10	1, 2, 9
休日	1, 6, 8	3, 12, 15	4, 9, 14	2, 11, 13	4, 5, 7	3, 12, 15	5, 7, 10

対応可能な看護師 6 が割当てられており, 火曜日には 10, 水曜日には 10, 木曜日には 6, 金曜日には 14, 土曜日には 14, 日曜日には 10 が割当てられている. 同様に, 第 2 週目の月曜日には看護師 10, 火曜日には 6, 水曜日には 6, 木曜日には 10, 金曜日には 8, 土曜日には 8, 日曜日には 10 が割当てられているのが分かる.

次に, 実験 2 の NSP^{PS} における制約違反数の総和は 3, 求解時間は 0.26 秒であった. 表 3 に得られた勤務シフトを示す. 本実験において, ランダムに決定された, 各患者に対応可能な看護師 4 人は以下である.

- 1 人目の患者 p_1 に対応可能な看護師: 2, 4, 7, 12,
- 2 人目の患者 p_2 に対応可能な看護師: 6, 9, 10, 11,
- 3 人目の患者 p_3 に対応可能な看護師: 1, 3, 5, 13.

また, 患者 p_1 の入院期間は 5 日間 (第 1 週目の月曜日から金曜日まで), 患者 p_2 の入院期間は 10 日間 (第 1 週目の月曜日から第 2 週目の水曜日まで), 患者 p_3 の入院期間は 14 日間とした. 表 3 より, 2 週間内の日勤, 準夜勤, 深夜勤には, 必ず各患者に対応可能な看護師が割当てられているのが分かる. 例えば, 患者 p_1 に着目すると, 第 1 週目の月曜日の日勤には, 対応可能な看護師 4 が, 準夜勤には 7 が, 深夜勤には 2 が割当てられており, 金曜日の日勤には看護師 4 が, 準夜勤には 7 が, 深夜勤には 2 が割当てられているのが分かる. ただし, 土曜日, すなわち, 患者 p_1 が退院した土曜日からは, 必ずしも対応可能な看護師が割り当てられているわけではない. 例えば, 第 1 週目の土曜日の準夜勤をみると, 看護師 1, 6, 8, 15 が割当てられており, 患者 p_1 に対応可能な看護師は一人もいない.

さらに, 患者数と看護師を増やした, 患者数 4, 看護師 20 人の 2 週間の NSP^{PS} における, 制約違反数の総和は 5, 求解時間は 0.26 秒であった. 以上の結果より, NSP^{PS} は, 患者数や患者の入院期間に大きく依存することなく, 実時間内で求解可能であることが分かった.

5. 結言

本論文では, 患者の症状を考慮したナース・スケジューリング問題 (NSP^{PS}) のフレームワークを定義した. また, NSP^{PS} を 0-1 整数計画問題として定式化し, 最適化ソルバー CPLEX を用いて, NSP^{PS} を求解した. 実験結果より, 患者が 3-4 人, 看護師が 15-20 人程度の

2 週間の NSP^{PS} は, 患者の入院期間に依存することなく, 高速に求解可能であることが分かった.

今後の課題として, 急な入院患者に対応可能な動的な NSP^{PS} が挙げられる. 患者の症状はプライバシーの問題があるため, 実データを用いた評価実験は困難であると思うが, 少なくとも現場で利用可能なソフトウェアの開発は重要な課題であると考えられる. その他にも, NSP 以外のスケジューリング問題, 例えば, 手術室スケジューリング問題等への適用が挙げられる [7].

参考文献

- [1] S. Abdennadher and H. Schlenker. Nurse Scheduling using Constraint Logic Programming. In *In Proceedings of the 16th National Conference on Artificial Intelligence*, pages 838–843, 1999.
- [2] M. Awadallah, A. Khader, M. Al-Betar, and A. Bolaji. Nurse rostering using modified harmony search algorithm. In *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*, pages 27–37, 2011.
- [3] E. Burke, P. Causmaecker, G. Berghe, and H. Landeghem. The State of the Art of Nurse Rostering. *Journal of Scheduling*, 7(6):441–499, 2004.
- [4] E. Burke and T. Curtois. New approaches to nurse rostering benchmark instances. *European Journal of Operational Research*, 237(1):71–81, 2014.
- [5] Z. Lü and J. Hao. Adaptive neighborhood search for nurse rostering. *European Journal of Operational Research*, 218(3):865–876, 2012.
- [6] M. Yoshida, T. Okimoto, and K. Hirayama. Resilient nurse scheduling problem. In *proceedings of International Symposium on Scheduling*, pages 162–167, 2019.
- [7] 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.
- [8] 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.