

0-1 整数計画法によるレジリエントなナース・スケジューリング

吉田 基輝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 はじめに

24 時間体制で人命を守る看護師が無理なく働けるような勤務形態を考えることは重要である。ナース・スケジューリング問題 (Nurse Scheduling Problem, NSP)[1, 5] 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な勤務表を作成する組合せ最適化問題であり、AI 及び OR 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、充足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表を組むのは非常に困難な問題である。また看護師の勤務表は、看護師長が労働時間外に手作業で作成している場合が多く、その負担を軽減する必要もある。

レジリエンス (resilience) とは、心理学、生態学、防災学等の様々な研究分野において広く知られているシステムレベルの性質に関する概念である。Holling[2] は外的な変動に対して耐性があり、かつ、実際に外乱によって機能が低下しても回復可能性があるような生態系をレジリエントであると定義している。また Schwind ら [3] は、レジリエントなシステムを動的環境における制約最適化問題のフレームワークを用いて定式化した。

実際の医療現場では、不測の事態により、勤務表を急遽修正せざるを得ない事態が頻繁に起こっている。レジリエントなナース・スケジューリング問題 (Resilient Nurse Scheduling Problem, ResNSP)[4] とは、レジリエンスに関する解概念を導入した NSP である。既存研究 [4] では、汎用プログラミング言語である Scala 上で実装された SAT 型制約プログラミングシステム *Scalab* を用いて、レジリエントな勤務表を作成している。しかしながら、従来手法では、看護師 7 人の 1 週間分の小規模な問題でも求解時間に数時間かかるという問題があった。

本論文では、ResNSP を 0-1 整数計画問題として定式化し、最適化ソルバー CPLEX を用いてレジリエントな勤務表を作成する。実験では、看護師 20 人の 2 週間分の ResNSP を解き、レジリエントな勤務表を約 66 分で作成することに成功した。

2 NSP と ResNRP

ナース・スケジューリング問題 (NSP)[1, 5] 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な勤務表を作成する組合せ最適化問題であり、 $NSP = \langle X, W, L, C, \alpha, \phi \rangle$ の組により定義される。ここで、 $X = \{x_{11}, \dots, x_{mn}\}$ は看護師及び日付からなる変数の集合、 $W = \{o, m, e, n\}$ は変数値の集合 (o : 休み, m : 日勤, e : 準夜

勤, n : 夜勤), $L = \{l_1, \dots, l_5\}$ は看護師のスキルレベルの集合 (l_1 が最も高く, l_1 は婦長, l_5 は新人看護師), C は制約の集合, α は各看護師のスキルレベルを返す写像, ϕ は制約違反数を計算する目的関数を表す。NSP を解くとは、制約違反数が最小となるような全変数への割当 (勤務表) を見つけることである。

レジリエントなナース・スケジューリング問題 (ResNSP) [4] とは、レジリエンスに関する解概念を導入した NSP である。NSP に関して、非負整数 k, p, q が与えられているとする。ある勤務表 S に関して、 S が (k, p) -耐性があり、かつ、 (k, q) -回復可能性があるとき、 S は (k, p, q) -レジリエントであるという。ある勤務表 S に関して、任意の k 人が欠勤したとしても、制約違反数が p 以下であるとき、 S は (k, p) -耐性があるという。また、ある勤務表 S に関して、任意の k 人が欠勤したとしても、勤務割当変更数が q 以下で再編成可能な勤務表 S' が存在するとき、 S は (k, q) -回復可能性があるという。従来の NSP では、制約違反数が最小となるような最適解を見つけることを目的としている。一方、ResNSP では、複数存在する NSP の最適解の中からレジリエントな解を見つけることを目的としている。

以下、ResNSP に関する決定問題の定義を与える。

定義 1 (ResNSP : 決定問題).

- 入力: NSP 及び、非負整数 k, p, q ,
- 質問: (k, p, q) -レジリエントな勤務表は存在するか?

3 0-1 整数計画法による ResNSP

本章では ResNSP を 0-1 整数計画問題として定式化する。

- 勤務割当に関する変数: $x_{i,j,k} \in \{0, 1\}$. 看護師 i の j 日における勤務割当が k である場合は 1, それ以外の場合は 0.
- 勤務希望に関する変数: $y_{i,j} \in \{0, 1\}$. 看護師 i の j 日における勤務希望が充足された場合は 1, それ以外の場合は 0.
- 勤務割当変更数に関する変数: $z_{i,j} \in \{0, 1\}$. 看護師 i の j 日の勤務割当が変更された場合は 1, 変更無しの場合は 0.
- 制約 1: 7 連続以上の勤務及び、3 連続以上の深夜勤割当の禁止。ここで、 j_1, \dots, j_7 は任意の連続する勤務日を表す。

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

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

- 制約 2: 日付毎に必要最低限の看護師数を割当てなければならない (例: 日勤 7 名, 準夜勤 6 名, 深夜勤 4 名以上).

表 1 看護師数 20 人の 2 週間の ResNSP における (1, 10, 17)-レジリエントな勤務表の例。* は休日希望が満たされなかった勤務。

看護師 (レベル)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
月	n	e	n	m	o	e	m	e	m	o	n	e	e	m	m	n	m	o	e	m
火	n	n	o	m	m	e	e	e	m	e	o	n	e	n	m	o	m	m	e	m
水	o	n	e	m	m	e	e	n	n	e	e	o	n	e	o	m	m	m	o	m
木	m	o	n	n	m	e	e	n	n	e	e	o	e	m	m	m	m	m	o	o
金	m	m	o	n	e	n	n	o	o	e	e	m	n	m	m	m*	e	m	m	e
土	m	m	m	o	n	n	n	e	m	n	e	e	o	m	o	m	e	m	m	e
日	e	m	m	m	n*	o	o	e	e*	n	n	e	m	e	m*	n	o	m	m	e
月	n	m*	m	m	o	m	e	e	e	o	n	e	e	n*	m	n	m	o	m	e*
火	o	n	m	m	m	m	e	n	e	e	o	n	e	n	e	o	m	m	m	e
水	e	n	m*	m	m	e	n	n	n	e	m	o	e*	o	e	m	m*	m	o	e
木	e	o	n	m	m	e	n	o	n	e	e	m	n	m	e	m	m	e	m	o
金	e	m	o	n	n	n	o	m	o	e	e	m	n	m	e	m	m	e	e	m
土	n	m	m	o	n	n	m	m	m	n	e	e	o	m	o	e	e	e	e	m
日	n	e	e	m	o	o	m	m	m	n	n	n	m	m	m	e	o	e	e	e

$$\bigwedge_{j \in M} \sum_{i \in N} x_{i,j,m} \geq 7, \quad \bigwedge_{j \in M} \sum_{i \in N} x_{i,j,e} \geq 6, \\ \bigwedge_{j \in M} \sum_{i \in N} x_{i,j,n} \geq 4$$

- 制約 3: 修正前後で各看護師の休日数は同じでなければならない。ここで、 q_i は各看護師の変更前の休日数を表す。

$$\bigwedge_{i \in N} \sum_{j \in M} x_{i,j,o} = q_i$$

- 制約 4: 新人 (l_5) のみでの深夜勤労働の禁止。

$$\bigwedge_{i \in N_{\{l_5\}}} \bigwedge_{j \in M} (x_{i,j,n} = 1 \Rightarrow \bigvee_{i' \in N_{\{l_1..4\}}} x_{i',j,n} = 1)$$

- 制約 5: 最低 16 時間の休息を確保しなければならない。

$$\bigwedge_{i \in N} \bigwedge_{((j_1,k),(j_2,k'),(j_3,k''))} x_{i,j_1,k} + x_{i,j_2,k'} + x_{i,j_3,k''} \leq 1$$

- 制約 6: 各看護師の休日希望はなるべく満たさなければならない。 $r_{i,j,o}$ は看護師 i の j 日に対する休暇希望を表す。

$$\bigwedge_{i \in N} \bigwedge_{j \in M} x_{i,j,o} = r_{i,j,o}$$

- 目的関数 1: (k, p)-耐性に関する目的関数。

$$\max. \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} y_{i,j}$$

- 目的関数 2: (k, q)-回復可能性に関する目的関数。

$$\min. \sum_{i \in N} \sum_{j \in M} z_{i,j}$$

4 評価実験

実験では、看護師数 20 人の 2 週間の ResNSP を求解した^{*1}。制約条件は上述した制約 1 から 5 をハード制約、各看護師の休日希望 (2 週間内の任意の 2 日をランダムに決定) をソフト制約とした。各看護師のスキルレベルの内訳は看護師 1, 2, 3, 4 が l_1 、看護師 5, 6, 7, 8 が l_2 、看護師 9, 10, 11, 12 が l_3 、看護師 13, 14, 15, 16 が l_4 、看護師 17, 18, 19, 20 が l_5 とした。また欠席者数は $k = 1$ とした。本実験設定では (k, p)-耐性がある解、

^{*1} 従来の NSP では 1 カ月の勤務表作成が一般的である。しかし、ResNSP のように看護師の急な欠勤を考慮した問題では、1 カ月の勤務表作成は現実的ではない。そこで、本研究では 2 週間の勤務表を作成している。

すなわち、制約違反数が最小となるような NSP の解が複数存在していたため、100 個の (k, p)-耐性があり、かつ、(k, q)-回復可能性がある解を計算し、レジリエントな勤務表を求解した。表 1 に得られた (1, 10, 17)-レジリエントな勤務表の一例を示す。

5 おわりに

本論文では、レジリエントなナース・スケジューリング問題 (ResNSP) を 0-1 整数計画問題として定式化し、レジリエントな勤務表を作成した。従来の NSP では制約違反数が最小となるような勤務表の作成を目的としている。一方、ResNSP では制約違反数の最小化に加え、不測の事態に対応可能なレジリエントな勤務表の作成を目的としている。実験では、看護師 20 人の 2 週間の ResNSP において (1, 10, 17)-レジリエントな勤務表 (任意の欠勤に対して、(1, 10)-耐性があり、(1, 17)-回復可能性がある勤務表) が約 66 分で求解可能であることを示した。

今後の課題としては、実データを用いたレジリエントな勤務表作成や、現場で利用可能なシステムの開発が挙げられる。また、NSP 以外のスケジューリング問題への適用が挙げられる。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、JSPS 基盤研究 (A) (課題番号: 17H00763) の研究助成を受けました。ここに感謝致します。

参考文献

- [1] E. Burke, P. Causmaecker, G. Berghe, and H. Landeghem. The State of the Art of Nurse Rostering. *Journal of Scheduling*, 7(6):441-499, 2004.
- [2] C. Holling. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4:1-23, 1973.
- [3] N. Schwind, M. Magnin, K. Inoue, T. Okimoto, T. Sato, K. Minami, and H. Maruyama. Formalization of resilience for constraint-based dynamic systems. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 2:17-35, 2016.
- [4] 沖本天太, 平山勝敏, 番原睦則, and 井上克巳. レジリエントなナース・スケジューリング問題. In 第 17 回科学技術フォーラム, pages 37-40, 2018.
- [5] 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.