

レジリエントなナース・スケジューリング問題

On Resilience in Nurse Scheduling Problem

沖本 天太*
Tenda Okimoto

平山 勝敏*
Katsutoshi Hirayama

番原 睦則†
Mutsunori Banbara

井上 克巳‡
Katsumi Inoue

1. はじめに

ナース・スケジューリング問題 (Nurse Scheduling Problem, NSP) [2, 11] とは, 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であり, 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る. NSP における制約条件には, 例えば, 労働基準法に反するような勤務を割り当ててはならない等の絶対に満たさなければならないハード制約と, ハード制約を緩和したソフト制約と呼ばれる制約条件が存在する. 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シフトを組むのは非常に困難である. また, 看護師の勤務シフトは, 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. これらの問題を解決するため, 勤務シフトを自動作成する様々なアルゴリズムが開発されている [1, 3, 5].

実際の医療現場では, 勤務シフト作成後に不測の事態, 例えば, 看護師や, その家族の事故や急病等による欠勤により, 既存の勤務シフトを急遽修正せざるを得ない事態が頻繁に起こっている. ナース・リスケジューリング問題 (Nurse Rerostering Problem, NRP) [6, 9] とは, 看護師の急な欠勤により既存の勤務シフトを再編成する動的な NSP である. NRP を解くとは, 既存の勤務シフトからの勤務割当変更数が最小となる, すなわち, 既存の勤務シフトからの勤務内容がなるべく同じになるような勤務シフトを再編成することである.

レジリエンスとは, 心理学, 生態学, 環境科学, 防災等, 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 [4, 7]. 例えば, Holling[4] は, 外的な擾乱 (想定外の事態) に対するシステムの耐性及び, 回復可能性を用いてレジリエンスを定義している. また, Schwindら [7] 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 (SR-model) を用いて定式化している.

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 (Resilient Nurse Scheduling Problem, ResNSP) を提案する. ある勤務シフトが (k, p, q) -レジリエントであるとは, (k, p) -耐性があり, かつ, (k, q) -回復可能性があることをいう. ある勤務シフトが (k, p) -耐性があるとは, 任意の k 人が不測の事態で急遽欠勤したとしても, 修正後の勤務シフトにおいて, 制約違反数が p 以下で制限されていることをいう. ある勤務シフトが (k, q) -回復可能性があるとは, 任意の k 人が急遽欠

勤したとしても, 既存の勤務シフトからの勤務割当変更数が q 以下で再編成可能であることをいう. さらに, ResNSP の解法を提案する. 実験では, 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 [8] を用いて, ResNSP を定式化し, レジリエントな勤務シフトを作成する.

NSP に関する既存研究において, 勤務シフトのレジリエンスに着目した研究はほとんど存在しない. NSP では与えられた制約条件をなるべく満たすように勤務シフトを作成することを目的としているのに対し, NRP では修正前後の勤務割当変更数の最小化を目的としている. 後者の NRP は, 不測の事態に対するリアクティブなアプローチであり, 欠勤した看護師の情報は既知である. 一方, ResNSP はプロアクティブなアプローチであり, 任意の欠席者 (どの看護師がいつ欠席するかは既知ではない) を考慮している点が NRP とは異なる.

2. NSP と NRP

本章では, NSP 及び NRP を概説する. 看護師の勤務形態や制約条件は国, 地域, 医療施設により様々であるが, 本論文では, 3交代制 (8:00-16:00 までの日勤, 15:30-23:00 までの準夜勤, 22:30-8:30 までの深夜勤) の NSP を対象とする. 以下, NSP 及び NRP における基本用語及び, 代表的な制約条件を与える [2, 6, 9].

- $N = \{1, \dots, m\}$: 看護師の集合.
- $D = \{1, \dots, n\}$: 勤務期間内の日付の集合.
- $X = \{x_{11}, \dots, x_{mn}\}$: 変数の集合.
- S : 看護師と日付からなる勤務シフト.
- $W = \{o, m, e, n\}$: 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. l_1 が最も高く, l_1 は婦長, l_5 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.
- $\alpha: N \rightarrow L$: 各ナースのスキルを返す写像.

制約 1: 労働基準法に反するような勤務を割り当ててはならない. 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り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.

§ 充足可能性問題 (Satisfiability problem ; SAT)

*神戸大学大学院海事科学研究科

†神戸大学情報基盤センター

‡国立情報学研究所

制約 3: 勤務割当変更前後の勤務シフトにおいて, 各看護師の休日数は同じでなければならない.

制約 4: 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 5: 現在の勤務シフトから次の勤務シフトまで最低 16 時間の休憩時間を確保しなければならない.

制約 6: 各看護師が提出する勤務希望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.

ナース・スケジュールリング問題 (Nurse Scheduling Problem, NSP) [2, 11] 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看護師の勤務シフトを作成する組合せ最適化問題である. NSP は $\langle X, W, L, C, \alpha, \phi \rangle$ の組により定義される. 全変数への割当を A とし, 目的関数 ϕ は,

$$\phi(A, c) = \begin{cases} 0 & c \in C_h \text{ is satisfied by } A, \\ \infty & c \in C_h \text{ is violated by } A, \\ 1 & c \in C_s. \end{cases} \quad (1)$$

$$\phi(A) = \sum_{c \in C} \phi(A, c) \quad (2)$$

により与えられる. NSP を解くとは, すべてのハード制約が充足可能であり, かつ, ソフト制約違反数が最小となるような勤務シフトを作成すること, すなわち, $\phi(A)$ が最小となる割当 A をみつけることである.

ナース・リスケジュールリング問題 (Nurse Rerostering Problem, NRP) [6, 9] とは, 看護師の急な欠勤 (本人または, その家族の事故や急病等) により, 既存の勤務シフトを再編成する動的な NSP である. NRP は $\langle X, W, L, C, S, \alpha, \varphi \rangle$ の組により定義される. 全変数への割当を A とし, 目的関数 φ は,

$$\varphi(S, A) = \sum_{i,j} g(w_{ij}, w'_{ij}), \quad w_{ij} \in S, \quad w'_{ij} \in A. \quad (3)$$

$$g(w_{ij}, w'_{ij}) = \begin{cases} 0 & w_{ij} = w'_{ij}, \\ 1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

により与えられる. NRP を解くとは, 修正後の勤務シフトにおいて, すべてのハード制約が充足可能であり, かつ, 修正前後の勤務割当変更数が最小となるような勤務シフトを再編成すること, すなわち, $\varphi(S, A)$ が最小となるような割当 A をみつけることである.

例 1 (NSP 及び NRP). 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 6 を除く, 制約 1 から制約 5 を対象とする. 表 1 に, すべて制約を満たす NSP の解を示す. 今, 看護師 5 が急病により月曜日に急遽欠勤せざるをえなくなったとする. まず, 看護師 5 の月曜日のシフトは m から欠勤 (欠) となり, 制約 2 よ

表 1: 7 人の看護師の 1 週間の勤務シフト.

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

表 2: 看護師 5 が月曜日に欠勤したときの修正後の勤務シフトの例. 太字は変更された勤務割当てを表す.

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

り, 休日であった看護師 1 が看護師 5 の代わりにシフト m を担当する. 次に, すべての制約条件が充足されるように, 看護師 1 の土曜日のシフト e を o に, 看護師 3 の金曜日のシフト e を n に, 看護師 4 の日曜日のシフト n を m に, 看護師 5 の金土日のシフト n, o, m を e, e, n に変更する. 表 2 に, すべての制約条件を満たす NRP の解を示す. この問題における, 修正前後の勤務割当変更数は看護師 5 の欠勤を含めて 8 となる.

3. ResNSP

本章では, レジリエントなナース・スケジュールリング問題 (Resilient Nurse Scheduling Problem, ResNSP) を提案する. ある勤務シフトが (k, p, q) -レジリエントであるとは, (k, p) -耐性があり, かつ, (k, q) -回復可能性があることをいう. 以下, 勤務シフトの耐性, 回復可能性及び, レジリエントな勤務シフトを定義する. NSP に関して, 非負整数 k, p, q が与えられているとする.

定義 1 (耐性). NSP における, ある勤務シフト 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.

定義 2 (回復可能性). NSP における, ある勤務シフト 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割当 A が存在するとき, S は (k, q) -回復可能性があるという.

定義 3 (レジリエンス). NSP における, ある勤務シフト S に関して, (k, p) -耐性, 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.

以下, ResNSP に関する決定問題の定義を与える.

定義 4 (RNSP: 決定問題).

- **Input:** NSP 及び, 非負整数 k, p, q ,
- **Question:** (k, p, q) -レジリエントな勤務シフトは存在するか?

表 3: 各看護師が各曜日に欠勤したときの, 修正前後の勤務割当変更数 (- は元々休日であるため考慮しない) .

看護師 (レベル)	月	火	水	木	金	土	日
1 (l_1)	-	8	13	8	8	8	5
2 (l_2)	8	10	13	-	6	12	12
3 (l_3)	5	8	9	10	8	4	-
4 (l_3)	8	12	10	6	-	4	8
5 (l_4)	8	11	13	10	4	-	4
6 (l_4)	10	10	-	13	10	12	10
7 (l_5)	8	-	10	12	13	13	9

例 2 (ResNSP). 例 1 と同じ問題設定で ResNSP を考える. ここでは $k = 1$, すなわち, 任意の 1 人の看護師の不測の事態による欠勤を考える. また, $p = 0$ (すべての制約条件を充足しなければならない)[†] 及び, $q = 8$ (勤務割当変更数は 8 以下) とする. 表 1 の勤務シフトが (1, 0, 8)-レジリエントな勤務シフトであるかを検証する. 表 2 の NRP では, 看護師 5 の欠勤は既知であり, 修正後の勤務割当変更数は 8 となる. しかし, ResNSP では, どの看護師がいつ欠勤するか事前には分かっていないため, 任意の看護師 ($k = 1$) の欠勤, すなわち, 各看護師が各曜日に欠勤したときの制約違反数及び, 修正前後の勤務割当変更数を計算する必要がある. 表 3 に, すべてのシナリオにおける, (1, 0)-耐性がある勤務シフトの修正前後の勤務割当変更数を示す. 例えば, 看護師 2 が月曜日に欠勤した場合の勤務割当変更数は $q = 8$, 看護師 7 が日曜日に欠勤した場合の勤務割当変更数は $q = 9$ となる. 表 1 は (1, 0)-耐性がある勤務シフトではあるが, (1, 8)-回復可能性はない. よって, 表 1 は (1, 0, 8)-レジリエントな勤務シフトではない.

ResNSP に関して, いくつかの最適化問題が考えられる. 例えば, 欠席者数 k を固定し, 制約違反数 p または勤務割当変更数 q を最小化するような問題や, 逆に p, q を固定し, k を最大化するような問題, その他にも, k, p, q の値を同時に最適化する多目的最適化問題が挙げられる. 実験では, 簡単化のため, $k = 1$ 及び $p = 0$ とし, q を最小化するような最適化問題を扱う.

4. ResNSP の解法と実験

本章では, ResNSP の解法について概説する. また実験では, 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である Scalab [8] を用いて, ResNSP を定式化し, レジリエントな勤務シフトを作成する. 以下, 本解法の概要を説明する. 本解法は 3 段階によって構成されている.

段階 1: NSP を解き, 最適解の集合 S^* を求める.

段階 2: 最適解の集合 S^* の各要素 $S_j^* \in S^*$ に対して, (k, p)-耐性及び, (k, q)-回復可能性を調べ, 最低限保証される勤務割当変更数をそれぞれ計算する.

段階 3: 段階 2 で計算した最低限保証される値が最小となる勤務シフトを, 最適解の集合 S^* から選ぶ.

段階 1 では, 与えられた NSP における最適解の集合 ($S^* = \{S_1^*, \dots, S_m^*\}$ と記述する) を求める. 従来の NSP では, ある最適解を 1 つ求めれば十分であったが, ここでは, すべての最適解からなる集合を求める.

段階 2 では, 最適解の集合の各要素 ($S_j^* \in S^*, 1 \leq j \leq m$) に対して, 任意の k 人の看護師が欠勤した際の (k, p)-耐性及び, (k, q)-回復可能性を調べ, 最低限保証される勤務割当変更数, すなわち, すべてのシナリオにおける (k, q)-回復可能性の q の最大値を計算する.

段階 3 では, 段階 2 で計算された最適解の集合の各勤務シフトに関して, 最低限保証される勤務割当変更数 q の最大値が最小となるような勤務シフトを求める.

実験では, SAT 型制約プログラミングシステム Scalab を用いて ResNSP を定式化し, レジリエントな勤務シフトを作成する. ここでは, 欠席者数は $k = 1$ とし, 制約違反数は $p = 0$ (すべての制約条件をハード制約) として扱う. また, 看護師数は 7 人, 勤務期間は 1 週間, 各看護師のスキルレベルは, 看護師 1, 2, 3 が l_1 , 看護師 4 が l_2 , 看護師 5 が l_3 , 看護師 6, 7 が l_5 とした. 以下に, 変数, 制約条件及び, 目的関数を示す.

- 勤務割当: $p_{n,d,w} \in \{0, 1\}$. 看護師 n の d 日の勤務割当が w である場合は 1, それ以外の場合は 0.
- 割当変更数: $b_{n,d} \in \{0, 1\}$. 看護師 n の d 日の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 連続以上の深夜勤務の禁止. ここで, d_i, d_j, d_k は任意の連続する 3 日間の勤務日を表す.

$$\bigwedge_{n \in N} \sum_{d \in D} p_{n,d,o} \geq 1 \quad (5)$$

$$\bigwedge_{n \in N} \sum_{(d_i, d_j, d_k)} p_{n,d_i,n} + p_{n,d_j,n} + p_{n,d_k,n} < 3 \quad (6)$$

- 制約 2: 日付毎に最低限必要な看護師数. 日勤は 3 名, 準夜勤は 2 名, 深夜勤は 1 名以上とする.

$$\bigwedge_{d \in D} \sum_{n \in N} p_{n,d,m} \geq 3 \quad (7)$$

$$\bigwedge_{d \in D} \sum_{n \in N} p_{n,d,e} \geq 2 \quad (8)$$

$$\bigwedge_{d \in D} \sum_{n \in N} p_{n,d,n} \geq 1 \quad (9)$$

- 制約 3: 勤務割当変更前後の各看護師の休日数は同じにする. ここで, q は変更前の休日数を表す.

$$\bigwedge_{n \in N} \sum_{d \in D} p_{n,d,o} = q \quad (10)$$

- 制約 4: 新人看護師 (l_5) はベテラン看護師 (l_1, l_2) と一緒に働かなければならない. $N_{\{l_5\}}$ は新人の集合, $N_{\{l_1, l_2\}}$ はベテラン看護師の集合を表す.

[†]すべての制約をハード制約とみなすと $p = 0$ となる.

表 4: (1, 0, 11)-レジリエントな勤務シフトの例 .

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

$$\bigwedge_{n \in N_{\{1,5\}}} \bigwedge_{d \in D} \bigwedge_{w \in S} (p_{n,d,w} = 1) \\ \Rightarrow \bigvee_{n' \in N_{\{1,1,2\}}} p_{n',d,w} = 1) \quad (11)$$

- 制約 5: 最低 16 時間の休息時間の確保 . d_i, d_j, d_k は任意の連続する 3 日間, w_i, w_j, w_k は連続する勤務, 例えば, 日勤 \rightarrow 準夜勤 \rightarrow 夜勤等を表す .

$$\bigwedge_{n \in N} \bigwedge_{((d_i, w_i), (d_j, w_j), (d_k, w_k))} p_{n,d_i, w_i} + p_{n,d_j, w_j} \\ + p_{n,d_k, w_k} \leq 1 \quad (12)$$

- 制約 6: 各看護師の勤務希望は満たさなければならぬ . 実験では, 看護師の勤務希望を以下のようにランダムに設定している . $p_1, \text{金}, o = 1, p_2, \text{日}, o = 1, p_3, \text{火}, o = 1, p_4, \text{木}, o = 1, p_5, \text{水}, o = 1, p_6, \text{土}, o = 1, p_7, \text{月}, o = 1, p_1, \text{月}, m = 1, p_1, \text{水}, e = 1, p_2, \text{金}, n = 1, p_2, \text{月}, e = 1, p_7, \text{土}, m = 1, p_7, \text{金}, m = 1$.

本実験設定において制約 1 から 6 の, すべての制約条件を満たす勤務シフトを Scalab を用いて求解したところ, 80 個の勤務シフトが得られた (段階 1) . 次に, 80 個の各勤務シフトに対して, 任意の看護師が欠席したとき, すべての制約条件が充足可能である, すなわち, (1, 0)-耐性がある勤務シフトにおいて, 最低限保証される勤務割当変更数を計算した (段階 2) . その結果, 27 個の (1, 0, 11)-レジリエントな勤務シフトと, 53 個の (1, 0, 12)-レジリエントな勤務シフトが得られた . 段階 3 より, 勤務割当変更数 q の最大値が最小となる勤務シフトは (1, 0, 11)-レジリエントな勤務シフトであり, その個数は 27 個であった . 表 4 に解の一例を示す .

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) のフレームワークを提案し, ResNSP における耐性, 回復可能性及び, レジリエンスをそれぞれ定義した . また, ResNSP に関する決定問題及び, 最適化問題を与えた . さらに, ResNSP の解法を提案し, 実験では, 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シフトを求解した .

NSP に関する研究の最大の目的は, 実際の医療現場で利用可能なシステムを開発することである . したがって, 今後の課題としては, ResNSP を解く効率的なシステムの開発・実用化が挙げられる . 本研究では, SAT 型制約プログラミングシステム Scalab を用いて, レジ

リエントな勤務シフトを生成したが, その他にも, 例えば, 解集合プログラミング (ASP)[10] を用いたアプローチも考えている . また, NSP 以外, 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 .

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] E. Burke and T. Curtois. New approaches to nurse rostering benchmark instances. *European Journal of Operational Research*, 237(1):71–81, 2014.
- [4] C. Holling. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4:1–23, 1973.
- [5] Z. Lü and J. Hao. Adaptive neighborhood search for nurse rostering. *European Journal of Operational Research*, 218(3):865–876, 2012.
- [6] M. Moz and M. Pato. Solving the problem of rerostering nurse schedules with hard constraints: New multicommodity flow models. *Annals OR*, 128(1-4):179–197, 2004.
- [7] 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.
- [8] T. Soh, N. Tamura, and M. Banbara. Scarab: A rapid prototyping tool for sat-based constraint programming systems. In *Theory and Applications of Satisfiability Testing - SAT 2013*, pages 429–436, 2013.
- [9] S.-M. Wu, T. Okimoto, K. Hirayama, and K. Inoue. Multi-objective nurse rerostering problem. *Multi-agent and Complex Systems*, pages 139–152, 2017.
- [10] 井上克巳 and 坂間千秋. 論理プログラミングから解集合プログラミングへ. コンピュータソフトウェア, 25(3):20–32, 2008.
- [11] 池上敦子. ナース・スケジューリング調査・モデル化・アルゴリズムー. 統計数理, 53(2):231–259, 2005.