

## ナース・スケジューリング問題に関する先行研究について

日大生産工(非常勤)  
日大生産工

○村山要司  
若林敬造

日大生産工 鈴木邦成  
日大生産工 豊谷純

## 1 はじめに

ホテルや飲食店,コンビニエンスストア,医療施設など,24時間365日,常時,人員を配置する必要があるような場合,複数の人員の労働日,労働時間をずらすことで対応する方法にシフト勤務がある。シフト勤務では,従業員・職員の誰が,いつ働くか,勤務の割り当てを行なった勤務表を作成する。実際の勤務表作成は,勤務に必要な人数,各人の能力や希望など様々な条件を考慮しながら決めなければならない,非常に手間と時間がかかる作業となり,熟練者が経験と勘に頼りに時間をかけて行うのが一般的である。しかし,勤務表作成に専任者を置いている企業は少数であり,多くの職場では,勤務全体かつスタッフ全員のことを理解している店長・リーダーなどが本来の業務と兼任で行っている。質の高いサービスを提供しながら,かつスタッフ一人一人が無理なく快適に働くことのできる勤務表を作成するために,また,そのための作業の負荷軽減のために,コンピュータによる支援のニーズは高い。

勤務表を作成する際の「仕事を誰に割り当てると効率的か」という問題を,数理計画では,シフト・スケジューリング問題と言う。ナース・スケジューリング問題は,医療施設における看護師の勤務表を作成する問題であり,シフト・スケジューリング問題の代表例である。

ナース・スケジューリング問題についての研究は,1970年代にアメリカで始まり,現在では世界中の多くの研究者が取り組んでいる。<sup>1)</sup>日本では,1996年,勤務表作成の現状把握のためにおこなった現場調査の結果とその結果に基づく数理計画モデル<sup>2)</sup>が示された。アメリカでは,限られた種類のシフト毎に雇用契約をするなど,1つのシフトが長く続くが,日本では,各看護師が複数のシフトを短い周期でローテーションする。また,個々の看護師のスキルや希望などを考慮する必要があり,各看護師についての勤務の組合せが多くなる。

ナース・スケジューリング問題は,何をもって最適解(勤務表)とするかの定義が難しく,定

義できたとしても,解を得ること自体が難しい最適化問題として知られている。

ナース・スケジューリング問題の研究は,問題の分析に着目したものと,問題を解くための解法に着目したものと,二種類に大別できる。現在までどのような研究が行われてきたか,各々の観点で分類を行った。

また,先行研究を調査することで,見えてきた今後の研究課題について報告する。

## 2 問題の分析

池上 他(1996)<sup>2)</sup>は,現場調査の結果により,勤務表作成にかかる条件を示している。

- (1) 毎日の各勤務に必要な人数を確保すること
- (2) スキルレベルや業務上の所属チームを考慮して各勤務のメンバーを構成すること
- (3) 各看護婦について各勤務の回数が決められた範囲であること
- (4) セミナー等その他の業務や休日の希望を達成すること
- (5) 禁止される勤務パターンを入れないこと

ここで,ナース・スケジューリング問題は,次のように定義されている。

## ナース・スケジューリング問題

看護師の入数  $m$ , スケジュール日数  $n$ , 勤務の種類の数  $w$ , スキルレベルやチーム構成等によるグループ,同じ勤務での組合せを避ける看護師ペアまたはグループ,前月の勤務表が与えられ,毎日の各勤務に必要な看護師数と各グループからの人数の上限と下限,各看護師の各勤務に対する回数の上限と下限,それら以外の業務の日程,休日希望日,そして禁止される勤務パターンが明らかであるとき,これらの条件の下でできるだけ希望目標が達成されるようなスケジュールを組みたい。

池上(2005)<sup>3)</sup>では,看護の質と看護師の生活の質の両方を守るべき,として,ナース・スケジューリング問題で考慮すべき条件は,各シフトの勤務

## Previous Studies on the Nurse Scheduling Problem

Yoji MURAYAMA, Kuninori SUZUKI,  
Keizou WAKABAYASHI and Jun TOYOTANI

メンバー構成に関わる「シフト拘束条件」と、各看護師の負荷に関わる「ナース拘束条件」とに分けられている。

### シフト拘束条件

各シフトに適した人数とスキルレベルの看護師を割り当てることにより看護の質を守ろうというもの。具体的には、各シフトの合計勤務人数や各グループからの人数に下限と上限を設定する。

### ナース拘束条件

以下の3つのタイプの拘束条件からなり、各看護師の労働負荷を考慮する。

- (1) 各シフトや休みの回数が適切である
- (2) 休みやシフトの希望日やセミナー参加を達成する
- (3) 看護師の健康に悪影響をもたらすシフトの並びを避ける
  - a) 同一シフトの連続回数の上下限を設定する
  - b) 同一シフトの勤務間隔日数の上下限を設定する
  - c) 異種シフトを含む禁止シフト並びを避ける

問題の目的は、これらの拘束条件をすべて満たすことである。

これらの研究は、日本のナース・スケジュール問題モデル化のベースとなり、ここで利用されている3交替制データ (Ikegami-3shift-DATA1) は、ベンチマークサイト (University of Nottingham) <sup>4)</sup>にも掲載され、問題例として、多くの研究者に取り組みられてきている。

ナース・スケジュールリング問題で求められているものは実用的な勤務表の作成であり、聞き取り調査や過去の勤務表を参考に制約が決定される。勤務表は人間から見て満足するものでなければならない。

長野・宮崎 (1996) <sup>5)</sup>は、各看護婦の勤務に対する嗜好の個人差にできるだけ対応した勤務パターンにするために、各看護婦の評価値を一定にするのではなく、看護婦の勤務パターンについてのアンケートから、評価値を看護婦別に設定している。

倉重 他 (2005) <sup>6)</sup>は、各種制約条件や評価値などは病院によって大きく異なるとし、個々の病院特有の条件設定を排除した基本的な条件だけを設定した。基本的制約条件のみが満たされたものを実行可能解とし、その中から勤務表作成担当者による満足を得るため、病院固有の条件を満たした満足解を求める。勤務表を一度に作成するのではなく、対話的に随時不都合部分を修正していく方法が示されている。

坂口 (2007) <sup>7)</sup>は、様々な制約条件や要望を考慮するために、出来るだけ実現させたい要望を「目的関数」として複数用意し、各目的関数のバイア

スが異なる条件下で、様々な観点によって作成された勤務シフトを並列的に提示している。

## 3 解法

ナース・スケジュールリング問題は複数の条件を満たすことを目的とする組合せ最適化問題である。

最適化問題は、一般に制約条件を満たす解の中で、目的関数を最小 (最大) にする解を求めるもので、次のように定義される。

$\min(\max)$	$: f(x)$	目的関数
$\text{subject to (s.t.)}$	$: g(x) \leq 0$	不等式制約条件
	$h(x) = 0$	等式制約条件
	$a \leq x \leq b$	設計変数

ナース・スケジュールリング問題は、最適解を求めるのが非常に困難なNP困難と呼ばれるクラスに属する問題である。このような計算困難な問題に対するアプローチとして、時間がかかっても最適性の保証された解を求める「厳密解法」と現実的な計算時間で良い実行可能解を求める「近似解法」がある。

### 3.1 厳密解法

厳密解法では、整数計画問題 (Integer Programming: IP) や制約充足問題 (Constraint Satisfaction Problem: CSP) などの標準問題の形に定式化して、汎用ソルバーを用いて解く場合が多い。組合せ最適化問題に対する汎用ソルバーとしては、混合整数計画問題 (Mixed Integer Programming: MIP) のソルバーが代表的であり、CPLEX<sup>®</sup>、XPRESS<sup>®</sup>、Gurobi<sup>10)</sup>、SCIP<sup>11)</sup>、GLPK<sup>12)</sup>など、商用、非商用を含め多数のパッケージが存在する。近年の計算機パワーの増大、最適化アルゴリズムの進化により、汎用ソルバーの性能は数年前に比べて飛躍的に向上し、計算不可能であった大規模な問題が扱えるようになってきている。<sup>13)</sup>

ナース・スケジュールリング問題は、厳密解を得ることが難しい問題として知られてきたが、乾・池上 (2010) <sup>14)</sup>は、混合整数線形計画問題 (Mixed Integer Linear Programming: MILP) および充足可能性判定問題 (Satisfiability Problem: SAT) として記述することで、汎用ソルバーによりナース・スケジュール問題の厳密解が得られることを示した。

MILPは、整数変数だけであっても一般変数が混ざっていても解くことができる。また記述性が高く、数式により様々な問題を記述できる。ナース・スケジュールリング問題は、様々な制約が  $L \leq \sum_i x_i \leq U$  のような形で現れるので、MILPによる記述は容易であるが、実際に解くことが困難

な問題が存在した,としている。MILPソルバーには,商用のCPLEX 12.0が用いられている。

SATは,CSPの一種であり,命題論理に特化した問題を扱う。論理式が真になる論理変数が存在する場合,論理式のことをSAT,真になる論理変数が存在しない場合,論理式をUNSATと呼ぶ。SATは判定問題であるので直接最適化問題を解くことはできない。そのため,繰り返し判定問題を解くことで厳密解を求める。MILPに比べ,SATでは論理変数の数・論理式が非常に多くなるが,MILPソルバーが解けない問題でもSATソルバーを使うことによって高速に解が求まった,としている。SATソルバーとしては,CLASP1.3.0<sup>15)</sup>が用いられている。

新妻 他<sup>16)</sup>は,汎用ソルバーを用いるのではなく,部分問題としてIPを生成して定式化,列生成法を使って解くことを検討している。

### 3.2 近似解法-メタヒューリスティクス

近似解法では,問題特有の性質を利用した専用ソルバーを適用あるいは開発を行う。その際に,利用されるアルゴリズムとして,メタヒューリスティクスが多く提案されている。最適性の保証は無いが,発見的法則,経験則によって問題解決を目指すアルゴリズムを総称してヒューリスティクスといい,特定の問題に依存せずに汎用的に対応できるように設計された基本的な枠組みをメタヒューリスティクスという。代表的なメタヒューリスティクスとしては,焼きなまし法(Simulated Annealing: SA),タブー・サーチ(Tabu Search: TS),遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA),ニューラルネットワークなどがある。

SAは最適解を探索する際に,局所最適解に陥らないように,ある確率で現在の解よりも悪くなるような移行も許し,その確率を温度というパラメータで制御している。その名称は,金属加工における焼きなましから来ている。(焼きなましは,金属材料を熱した後で徐々に冷やし,結晶を成長させてその欠陥を減らす作業である。)最初は温度が大きいので,解は大胆に変化するが,時間が経つとゼロに近づき,収束していく。

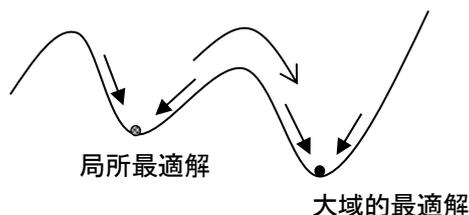


図 1 SAの概念図

TAは既に評価した解をタブーリストとして移行の履歴を管理し,探索が停滞することを防ぐ手法である。タブーリストに載っていない場合は状

態が悪くなくても遷移を行うため,局所最適解に陥ることを防ぐことができる。

池上 他(1996)<sup>2)</sup>では,SAが用いられていたが,シフトへの人数確保を優先する初期解と近傍を設定していたことで,ナース拘束条件をいくつか満たさない勤務表があった。

池上・丹羽(1998)<sup>17)</sup>,池上(2005)<sup>3)</sup>では,Subproblem - centric Approach(部分問題軸アプローチ)という手法を用いている。部分問題軸アプローチでは,看護師1人の最適スケジュールを得る問題を部分問題として,対象とする看護師のナース制約を満たしつつ「シフト制約を違反する度合い」を最小化する問題として定義し,イテレーション毎に看護師人数分の部分問題を解く。目的関数値が最も小さくなった部分問題の解を次の試行解に採用することを,TSによって繰り返すことで,全体の解を求めている。

野々部(2011)<sup>18)</sup>は,茨木俊秀・京都大学名誉教授らの研究グループで,重み付き制約充足問題

(Weighted Constraint Satisfaction Problem: WCSP) 汎用ソルバー(SCOP)の開発を行い,数多くの組合せ最適化問題に用いられている。WCSPは,CSPの一つであり,CSPの目的がすべての制約を満たす解を求めることであるのに対し,WCSPは,制約違反が最小の解を求めることを目的とする。SCOPのアルゴリズムにはTSが用いられている。SCOPは,ナース・スケジューリング問題に対するアルゴリズムの性能を競う国際コンペティションFirst International Nurse Rostering Competition 2010(INRC2010)<sup>19)</sup>に参加し,好成績を収めている。

GAは,ナース・スケジューリング問題に適した解法として,研究が盛んに行われている。GAは,生物の進化を模したアルゴリズムであり,ナース・スケジューリング問題では,染色体に見立てた各個体に様々な勤務シフトを符号化し,選択や交叉,突然変異を繰り返し行うことで最適解を探索していく。

看護師個人の嗜好を考慮した長野・宮崎(1996)<sup>5)</sup>では,GAが用いられているが,個体を看護師1人の勤務表とせず,個体を看護師人数分並べた全看護師の勤務表とし,これを幾つか生成して個体群としている。

坂口(2007)<sup>7)</sup>は,勤務表の公平性という観点から目的関数を4つ用意し,勤務表が符号化されたGAの各個体を,有限の2次元平面上に規則正しく配置した形状とし,平面上の地域によって生存する個体の傾向が異なるよう,個体選択の方法を改良した。個体に地域制の概念を導入することで,特定の目的関数のみを強く反映したものや,全ての目的関数を平等に考慮したものなど,多様性に富んだ勤務表を得ている。

ニューラルネットワークは,組合せ最適化問題によく用いられるが,ナース・スケジューリング問題に対する適用例は少ない。その要因として,金川 他 (2005) <sup>20)</sup>は,

(1) 従来のホップフィールド型ニューラルネットワークでは,ナース・スケジューリング問題に関するエネルギー関数の設定と,ニューロンの収束に問題があった

(2) ナース・スケジューリング問題で考慮すべきパラメータは日付,看護師,勤務シフトの3つであり,3次元構造によるニューラルネットワークを要求しているため,従来のアナログニューラルネットワークでは対応できない

といった問題点を挙げている。

金川 他 (2005) <sup>20)</sup>は,ホップフィールド型ニューラルネットワークにバイナリニューロンを用いるバイナリニューラルネットワークを3次元構成に拡張することにより,一定精度の勤務表生成が可能であることを示した。

#### 4 まとめと今後の研究課題

ナース・スケジューリング問題は,勤務表作成,シフト・スケジューリング問題の代表的な問題として,また,組み合わせ最適化問題の中の魅力的な問題として,様々な研究が行われてきた。実問題がモデル化され,ある程度複雑な条件でも良い解が求められる解法が提案されている。

しかしながら,ナース・スケジューリング問題の現実的な解決方法としては,これらに加えて,「ユーザーの利便性」や「コスト」についても考えなくてはならない。

また,勤務表作成の問題を抱える現場は,医療施設だけではない。問題のサイズやローテーションの性質が異なる他のシフト・スケジューリング問題への「汎用的な展開」も求められる。

こうした研究についてはまだ十分とは言えず,今後の課題として考えられる。

#### 「参考文献」

- 1) E.D.Burke,P.D.Causmaecker,G.V.Berghe and H.V.Landeghem, “The State of the art of Nurse Rostering”, J.of Scheduling,7, (2004) p.441-499.
- 2) 池上敦子,丹羽明,大倉元宏, “我が国におけるナース・スケジューリング問題”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学 41, (1996) p.436-442.
- 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, 第53巻 第2号, (2005) p.231-259.
- 4) University of Nottingham, Shift Scheduling Benchmark Instances,

<http://www.cs.nott.ac.uk/~tec/NRP/>

5) 長野弘志,宮崎茂次, “勤務に対する嗜好の個人差を考慮した看護婦スケジューリング”, 日本経営工学会論文誌,Vol.47,(1996) p143-149.

6) 倉重賢治,橋本敏生,亀山嘉正, “汎用性を考慮したナーススケジューリングシステム”, 日本経営工学会論文誌,Vol.56,(2005) p.109-120.

7) 坂口卓也, “地域型遺伝的アルゴリズムを用いたナーススケジューリング”, 情報処理学会研究報告. MPS,数理モデル化と問題解決研究報告 2007(128), (2007) p.247-250.

8) IBM, IBM ILOG CPLEX, <http://www-03.ibm.com/software/products/ja/ibmiilogplex>

9) FICO, FICO Xpress, <http://www.msi-jp.com/xpress/>

10) Gurobi Optimization, Gurobi Optimizer, <http://www.gurobi.com/>  
<http://www.octobersky.jp/products/gurobi/gurobi.html>

11) Zuse Institute Berlin, SCIP, <http://scip.zib.de/>

12) GNU Project, GLPK, <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>

13) 宮代隆平, “ここまで解ける整数計画”, システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, 50, (2006) p.363-368.

14) 乾伸雄,池上敦子, “ナーススケジューリング問題における混合整数線形計画問題と充足可能性判定問題による厳密解法の比較”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学,55, (2010) p.706-712.

15) Potassco project, clasp, <http://www.cs.uni-potsdam.de/clasp/>

16) 新妻真輔,池上敦子,品野勇治, “列生成法におけるナーススケジューリング問題の解法” 情報処理学会, MPS, 数理モデル化と問題解決研究報告 2009 (19),(2009) p.221-224.

17) 池上敦子,丹羽明, “ナース・スケジューリングに有効なアプローチ: 2交替制アルゴリズムにおける実現”, Journal of the Operations Research Society of Japan, 41, (1998) p.572-586.

18) 野々部宏司, “メタヒューリスティクスによる汎用ソルバーの構築(<特集>最適化技術の深化と広がり)”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, 56, (2011) p.257-262.

19) INRC2010 Home Page, Nurse Rostering Competition, <https://www.kuleuven-kortrijk.be/nrpcompetition>

20) 金川明弘,山根千佳,高橋浩光, “バイナリニューラルネットによるナース・スケジューリング問題の基本解の導出”, 情報処理学会論文誌. 数理モデル化と応用 46,(2005) pp.41-47.