

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07226

研究課題名(和文)医療機関における手術室のスケジューリング手法の開発

研究課題名(英文)Development of operating room scheduling methods in a medical institution

研究代表者

伊藤 真理 (Ito, Mari)

東京理科大学・理工学部経営工学科・助教

研究者番号：20778211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、2種類の手術室のスケジューリングモデルを提案する。一つは、重回帰分析より推定した手術の所要時間を用いて、どの手術室でいつ手術を開始するかを決定する手術室のスケジューリング問題を混合整数計画問題として定式化する。もう一つは、手術の所要時間を不確実な要因と考え、単一手術室での手術の順序を決定する手術室のスケジューリング問題を確率計画問題として定式化する。

研究成果の概要(英文)：In this research, we propose two types of operating room scheduling models. Firstly, we formulate multiple operating rooms scheduling problem that allocates surgeries to the most suitable operating room as a mixed-integer programming problem using the duration of surgery estimated by multiple linear regression analysis. Then, we formulate a single operating room scheduling problem that determines the sequences of surgeries as a stochastic programming problem including the duration of surgery as uncertain factor.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：スケジューリング 手術室の効率化 混合整数計画 確率計画 不確実性

## 1. 研究開始当初の背景

手術は医療機関の総収入の約3分の2を占める収入源である一方で、手術室の運営費用、医師や看護師などの人件費は、医療機関全体の支出の40%を占める。特に、残業における人件費は医療機関にとって、削減したい費用である。これらの背景を受けて、手術室の運営の効率化を担うために、手術室のスケジュールが作成されている。しかしながら、スケジュールどおりに手術室の運営が行われていない。そのため、医療現場では場当たりに手術を他の手術室へ変更することや、手術の終了時刻の予測がつかないために他の手術室へ変更せず、予定している手術室を待ち続けることが少なくない。

本研究では、このような手術室変更の可能性や手術の終了時刻などの不確実な要因を考慮しつつ、どの手術室でいつ手術を開始するかをリアルタイムに決定する問題を考える。また、手術室の選択や手術開始時刻の決定に関する問題をジョブショップ・スケジューリング問題(Job-shop Scheduling Problem: JSP)として捉え、順序付け規則を適用する。確率計画法に対しては、ヒューリスティックな手法を用いることで現実的な計算時間で実用的な解を導出し、手術室の効率的な運営の方法を提案する。さらに、医療機関の手術に関する実データを用いることにより計算実験を行い、本研究で提案する分析手法の有効性を検証する。

## 2. 研究の目的

本研究では、医療機関における手術室の運営において、2種類の手術室のスケジューリングモデルを提案する。1つめの手術室のスケジューリングモデルでは、確定的な手術の所要時間を用いて、どの手術室でいつ手術を開始するかを決定する。具体的には、手術の所要時間を重回帰分析によって推定した上で、手術室のスケジューリング問題を混合整数計画問題として定式化する。さらに、医療機関の手術に関する実績データを用いることにより計算実験を行い、本研究で提案する分析手法の有効性を検証する。

2つめの手術室のスケジューリングモデルでは、手術の終了時刻の不確実性を考慮しつつ、単一手術室での手術の順序を決定する。具体的には、手術の終了時刻を確率変数とする確率計画モデルとして示し、手術開始時刻を決定する。確率計画法に対しては、ヒューリスティックな解法を用いることで現実的な計算時間で実用的な解を導出し、手術室の効率的な運営の方法を提案する。さらに、医療機関の手術の実績データに基づいたデータを生成し、その生成したデータを用いて数値分析を行い、本研究で提案する分析手法の有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

本研究は以下のような計画で遂行した：

### (1) 問題のモデル化

ここでは2種類の手術室のスケジューリング問題を考える。1つめの問題は、確定的な手術の所要時間を考慮しながら、どの手術室でいつ手術を開始するかを決定する。手術の所要時間は愛知医科大学病院の手術9,311件の実績データを用いて、重回帰分析により推定する。その上で、手術室のスケジューリング問題を混合整数計画問題として定式化する。

2つめの問題は、手術の所要時間の不確実性を考慮しながら、単一手術室の最適な手術スケジュールを作成することである。本スケジュールは、手術の種類、診療科、手術の予測所要時間などを入力データとして作成する。さらに、手術室の変更の可能性について、この得られた解から予測する。確率計画モデルは、一般的に現実的な計算時間で最適解を得ることが困難なことが知られているため、実用的な解を求めるためのヒューリスティックな手法を使用する。たとえば、列生成法が確率計画法を解くために、良く使われている。

### (2) 解法の提案: 順序付け規則の提案

手術室のスケジューリング問題は、JSPで満たさなければならない先行制約や容量制約などの全ての条件を満たしている。そのため、手術はJSPにおけるジョブ、手術室はJSPにおけるマシンとみなすことができる。さらに、医師の他の業務によるスケジュールや手術室内の前後の診療科の関係などの条件も考慮しなければならない。順序付け規則には、PERT-CPM(Program Evaluation and Review Technique-Critical Path Method)やSPT(Shortest processing time)などの規則がある。これらの規則を考慮し、新たな規則を提案する必要がある。

### (3) 有効性の検証

#### (3-a) 解法の有効性の検証: 実績データを用いた計算実験

(1)と(2)の解法の開発で提案した手法の有効性について実データを用いた計算実験によって検証する。検証のポイントは、以下のとおりである。

- 実用的な時間内で解を得ることができているか
- 全手術室の終了時刻が実際よりも早くなっているか
- 手術室の運営コストが減少可能か

#### (3-b) 結果の解釈: 実際の手術室の運営に役立つ情報や知見の抽出

「手術室の運営コストを何%削減することができる。」や「手術の所要時間の平均値や

分散が大きければ、手術の開始時刻を遅くする方がよい。」などの知見が、実績データを用いた計算結果から得られる可能性がある。そのため、運営コストについての比較を行う。また、計算結果をスケジュール上に表し、視覚化できるようにする。

#### 4. 研究成果

当初の計画を多少変更はしたが、おおむね順調に進み、5の主な発表論文にあげるように多数の成果をあげることができた。それぞれの研究項目についての詳細は以下のとおりである。

##### (1) 問題のモデル化

1つめの手術室のスケジューリング問題について、研究成果の成果をあげることができた。研究成果では、愛知医科大学病院の手術室の運営管理を対象にし、手術室のスケジューリング問題をモデル化した。ここでは、愛知医科大学病院から9,311件の手術実績データの提供を受けた。このデータには、匿名化された患者のID、手術日、診療科、年齢、性別、術前診断、施行術式、執刀医などが記入され、時刻については入室時刻、退室時刻、麻酔開始時刻などが計測されている。

手術の所要時間は患者の入室時刻から退室時刻までと定義した。QQプロットを用いて正規性の検定を行ったところ、手術の所要時間は対数正規分布に従うとみなしてよいことがわかった。そこで本研究では、手術実績データの手術の所要時間の対数を用いて、重回帰分析を行った。重回帰分析とは、被説明変数(手術の所要時間)が複数の説明変数でどのくらい説明できるかを分析することである。説明変数は患者の年齢と性別、執刀医、術前診断、施行術式とした。13の診療科の手術について手術の所要時間を重回帰分析で推定した。各重回帰モデルに対しては、AIC (An Information Criterion)の基準を用いて、変数選択を行った。調節済み決定係数は約0.6以上となり、一定の精度で手術の所要時間を推定することができた。

手術室のスケジューリングはどの手術室でいつ手術を開始するかを決定する問題であり、混合整数計画問題として定式化した。手術室のスケジューリングの目的は、手術室の使用終了時刻からの超過時間を最小にすること、手術の予定開始時刻からの変更時間を最小にすること、各診療科の手術室使用可能枠からの超過時間を最小にすることである。さらに、患者の待ち時間を削減するために、手術の所要時間の標準偏差が小さい手術を早い時間帯に行うことも考慮した。スケジュール作成の制約条件としては、必ず予定している手術を行う、手術を重複して割当ててを防ぐ、同じ執刀医が同時刻に手術を行わない、手術の器具の数、診療科が使用する手術室の優先度、執刀医の希望開始時刻の考

慮などである。

2つめの手術室のスケジューリング問題について、研究成果の成果をあげることができた。当初の予定どおり、手術の所要時間の不確実性を考慮したモデル化を提案した。しかしながら、不確実性を考慮した確率計画モデルは求解が困難であることや求解に時間がかかる。今回、凸の性質を持つ条件付きバリュー・アット・リスク(以下、CVaR)を手術室のスケジューリング問題へ組み込み、求解に対する問題点を解決するとともに、外科医によって推定される手術の予想終了時刻から実際の手術終了時刻が大きく延びるリスク事象を表現した。このように手術の所要時間の不確実性の表現の仕方については、異なる方法を用いたことが当初の計画から大きな変更であったと考える。これに加え、手術の資源として重要な血液製剤の在庫管理を行うモデルを提案したことは、大きな進捗であった(研究成果)。

##### (2) 解法の提案: 順序付け規則の提案

手術室のスケジューリング手法を開発するために、問題の性質が似ているスケジューリング問題解決を行った(研究成果)。本研究課題で開発した2つの手術室のスケジューリングモデルはある一定のサイズの問題に対しては、現実的な計算時間内で最適解を求めることができた。そのため、ヒューリスティックな順序付け規則の提案は必要ではなくなった。

##### (3) 有効性の検証

###### (3-a) 解法の有効性の検証: 実データを用いた計算実験

1つめの手術室のスケジューリングでは、愛知医科大学病院の手術室の実績データを用いて計算実験を行った。本モデルは、16手術室に対して、手術が1日に20~40件予定されていると仮定した。問題は制約式3,571個と変数18,620個であり、約13秒で最適解を得た。

手術室のスケジュールの質を確認するために、看護師長が手作業で作成した同日のスケジュールと比較した。これらの結果より、手術室のスケジューリングシステムを使用して作成したスケジュールは、いくつかのスケジュールの問題点を改善することが可能となった。たとえば、手術室の閉室時刻からの延長時間を減らすことが可能となった。具体的には、1,500分削減の可能性を見出すことができた。また、手術の開始時刻の遅延を削減することが可能になった。

さらに、手術の所要時間を推定する手法が有効であるか、を検証するために、執刀医によって申告された手術の所要時間と推定した手術の所要時間を用いて混合整数計画モデルにより作成したスケジュールを比較した。その結果、推定した手術の所要時間を用いて作成したスケジュールは、執刀医によ

て申告された時間を用いて作成したスケジュールよりも手術室の使用終了時刻からの超過時間と手術の予定終了時刻からの変更時間を削減した。つまり、推定した手術の所要時間を用いて混合整数計画モデルによって作成したスケジュールが超過時間と変更時間の削減の観点から、最も質の良いスケジュールであることがわかった。以上より、手術の所要時間の推定と混合整数計画モデルの両方のアプローチが、手術室のスケジューリング問題を解決するために有効であるといえる。

2 つめの手術室のスケジューリングでは、研究成果で得られた実績データを用いて計算実験を行った。本モデルは、単一手術室に対して、手術が5件予定されていると仮定した。問題は制約式 2,729 個と変数 1,130 個であり、約3秒で最適解を得た。

全シナリオの手術の所要時間の期待値のみを考慮して手術室のスケジュールを作成する場合と手術の所要時間の延びのリスクを考慮して手術室のスケジュールを作成する場合とでは、手術の順序が異なった。手術の所要時間の延長リスクを考慮した場合、手術の所要時間が短く、かつ分散が小さい手術から順に実施するスケジュールが作成された。手術の所要時間の延長リスクを考慮したスケジュールは、それを考慮しなかった場合のスケジュールと比較して、手術室の閉室時刻が61分早くなった。

### (3-b) 結果の解釈: 実際の手術室の運営に役立つ情報や知見の抽出

1 つめの手術室のスケジューリング問題について、(3-a)の数値分析では、全手術室の閉室時刻からの超過時間について1,500分の削減を見込むことができた。手術室1部屋に対する1時間の運営コストを15万円とすると、1手術室の運営コストを約23万円削減する可能性を見出すことができた。

2 つめの手術室のスケジューリング問題について、(3-a)の数値分析では、単一手術室の閉室時刻からの超過時間について61分の削減を見込むことができた。手術室1部屋に対する1時間の運営コストを15万円とすると、単一手術室の運営コストを約15万円削減する可能性を見出すことができた。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Mari Ito, Fumiya Kobayashi, & Ryuta Takashima, Minimizing Conditional-value-at-risk for Operating Room Scheduling Problems, Proceedings of International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists 2018, 2, 968–973, 2018.

Mari Ito, Masatake Hirao, & Hiroki

Hamahara, A Support System for Nursery Staff Shift Scheduling: A Case Study at a Nursery School, Journal of Information Processing, 59(3), 294–300, 2018.

Mari Ito, Aino Onishi, Atsuo Suzuki, Akira Imamura, & Takuya Ito, Resident Scheduling Problem: A Case Study at Aichi Medical University Hospital, Japan Industrial Management Association, 68(4E), 259–272, 2018.

Mari Ito, Ayano Kaburagi, & Ryuta Takashima, Inventory Control of Blood Products Considering the Interchange among Different Regional-block Blood Centers in Japan, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017, 162–167, 2017.

Mari Ito, Atsuo Suzuki, & Yoshihiro Fujiwara, A Prototype of Operating Rooms Scheduling System: A Case Study in Aichi Medical University Hospital, Japan Industrial Management Association, 67(2E), 202–214, 2016.

[学会発表](計4件)

Mari Ito, Applications of Operations Research in Health Services, Urban Operations Research Workshop 2017, Nanzan University, Aichi, December 9, 2017.

Mari Ito, Ryuta Takashima, & Kazuhiro Kobayashi, Inventory Management and Scheduling for Blood Products: An Effect of Transfer among Regional Block Blood Centers, INFORMS Annual Meeting 2017, Invited session; Advances in Healthcare Logistics, George R. Brown Convention Center & Hilton Americas Houston, United States, October 23, 2017.

Mari Ito, Ryuta Takashima, & Kazuhiro Kobayashi, Effect of Regional Block Blood Centers on Japanese Blood Services, INFORMS healthcare 2017, De Doelen International Congress Centre, Rotterdam, Nederland, July 26, 2017.

伊藤真理, 医療分野のスケジューリング問題に対するオペレーションズ・リサーチの適用, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年度第2回支部講演会, 愛知県立大学サテライトキャンパス, 愛知, 2016年12月3日。

[その他](計1件)

日本経営工学会 平成28年度論文奨励賞, 研究業績, 2017年5月26日。

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

伊藤 真理 (ITO, Mari)

東京理科大学・理工学部経営工学科・助教  
研究者番号: 20778211