

手術室のスケジューリング

繁野 麻衣子, 松岡 博

医療サービスにおいて、どの手術をいつ、どの手術室で行うかを決定する手術室スケジューリングは、入院患者の病床スケジューリングと並ぶ重要な要素である。近年では、患者に負担をかけない手術の技術進歩によって、以前より入院期間が短くなる傾向にあり、手術室の運用を効率的にすることがより重要となっている。本稿では、まず、手術室がどのようにスケジュールされているかの現状を紹介し、スケジュールの中で鍵となっている手術室使用予定の影響を調べる。さらに、機材制約についても考察し、最後に課題を述べる。

キーワード：スケジューリング, 医療サービス, 手術室割当

1. はじめに

患者や医師にとって、手術が決まったら早く手術をして病状悪化を防ぎたいのはいうまでもないが、病院経営にとっても、手術室を効率的に運用することは重要な課題である。医療サービスにおいて、どの手術をいつ、どの手術室で行うかを決定する手術室スケジューリングは、入院患者の病床スケジューリングと並ぶ重要な要素であり、また、手術室スケジューリングと病床スケジューリングは、患者の流れに密接に関係している。近年では、患者に負担をかけない手術の技術進歩により、以前より入院期間が短くなる傾向にある。そこで、手術室の運用を効率的にすることがより重要となっている。

手術室スケジューリングはオペレーションズ・リサーチの分野でも数多くの研究がある（例えば、[3,4] など）。本稿では、手術室スケジューリングの実例と課題を紹介する。

2. 手術室スケジューリングの現状

まず、手術室のスケジュールが現状でどのように作成されているかを紹介しよう。以下、M病院を基にした説明であるが、多くの病院でも同様な方法でスケジュールされている。

手術室スケジュール決定までのプロセスを図1に示す。主治医からの手術申込に基づいて、スケジュールを担当する医師や看護師が1週間分の手術予定案を作

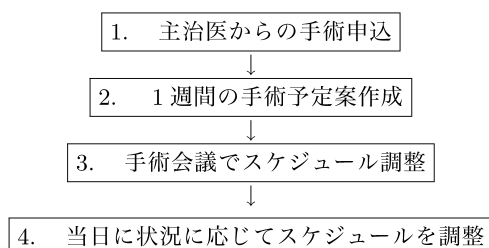


図1 手術室スケジュール決定のプロセス

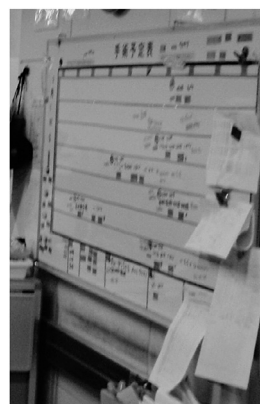


図2 当日のスケジュール調整を行うボード

成する。さらに、各診療科の医師が出席する会議にてスケジュール調整を行い、各日の手術とその順序を決定する。そして、当日にも緊急手術の有無や患者の状況などに応じて再スケジュールがなされる（図2）。

手術室のスケジュールに影響する事項には、主に

- スタッフ制約
- 部屋制約
- 機材制約

がある。スタッフ制約は、医師の外来診察や非常勤、看護師の担当可能性などである。部屋制約は、部屋の大

しげの まいこ
筑波大学システム情報系
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
まつおか ひろし
横浜南共済病院
〒236-0037 神奈川県横浜市金沢区六浦東 1-21-1

		月	火	水	木	金
room1	AM	形成	耳鼻	形成	耳鼻	フリー
	PM	形成	耳鼻	形成	耳鼻	フリー
room2	AM	眼科	フリー	口外	外科	眼科
	PM	眼科	口外	フリー	外科	眼科
room3	AM	心外	心外	整形	心外	整形
	PM	心外	心外	整形	心外	整形

図3 手術室使用予定の例

きさ、設置されている機材、扉の二重構造の有無などで、術式により使用できる部屋が制限されていることである。おおまかに、どの診療科がどの手術室を使用できるかは決まっているが、手術ごとの使用の可否は専門家の知識によるところが大きい。機材制約は、同じ機材を使用する手術を同時刻に並行して行えるかどうかの条件である。同じ術式でも執刀医により使用機材が異なることもあり、細かな条件をすべて網羅することは困難である。

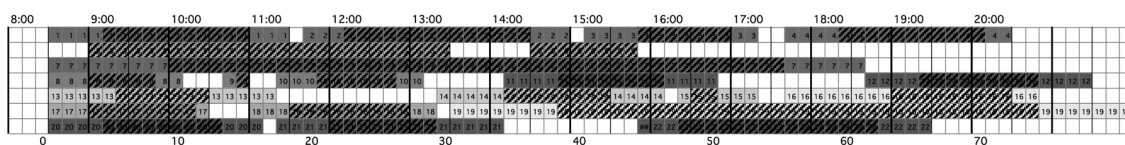
主治医の手術申込からスケジュール作成までを簡潔にするために、あらかじめ、曜日、時間帯、部屋ごとに使用する診療科を定めておく「手術室使用予定」がある(図3)。これに従えば、スタッフ制約、部屋制約がほぼ満たされるようになっている。この手術室使用予定に基づき主治医は手術を申し込むが、患者の病状により、予定の時間が空いたり、逆に予定外にも手術が必要になったりする。そこで、スケジュールを担当する医師や看護師による調整が必要となる。

図4の上段に1日の手術室ごとの実際のガントチャートの例を示す。各手術の入室から退室までを表し、斜線部分が執刀時間である。このスケジュール例から、部屋ごとの手術時間にばらつきがあり、その結果、1日の手術完了時刻が遅くなっていることがわかる。もし、最も遅く手術が終了する手術室の完了時刻を早められれば、麻酔医や看護師の勤務時間を短縮することがで

きる。現実問題として、麻酔医や看護師の勤務を軽減することが必要であるが、そのために、手術件数を減らすことは経営上困難であり、そしてなにより患者の手術日を遅らせることになり、患者の不利益となる。そこで、うまく手術のスケジュールを組むことで手術の完了時刻を早めることが重要である。また、看護師業務を軽減させるため、1日の手術完了後に清掃を業者委託する場合、手術室の完了時刻にばらつきがあると時間が確定できないため、契約時間は最も早い部屋の手術完了時間から最終手術が完了して清掃が終わる時間までとなり、契約額が高額となる。したがって、部屋ごとの完了時刻にばらつきが少ないほうが好ましい。たとえ、1部屋の手術完了時刻が遅くなっても、その部屋の清掃は当直看護師が行い、そのほかの部屋の完了時刻にばらつきがなければ、清掃業者との契約時間が確定でき、清掃金額も廉価となる。以上を鑑み、本研究では、部屋ごとの手術完了時刻を早め、かつ、手術完了時刻のばらつきを減らすことを目指す。

さて、図4の上段に示す手術に対し、最終完了時刻を早め、部屋ごとの完了時刻のばらつきを減らすスケジュールを下段に示す。これは、部屋制約や機材制約は考慮せず時間帯のみを考慮し、また、術前の麻酔導入時間や術後麻酔覚醒のリカバリー時間は同じ診療科のほかの手術時間に重ねることも可とした、つまり、同じ診療科の手術の執刀時間が重ならないようにして最適化モデルで解いた再スケジュールの結果である。この再スケジュールは最も効率的に手術室を運用した場合を示しているが、このようなスケジュールは時間上不確定である手術のスケジュールでは実用的ではないことは明らかである。不確定要素を考慮して確率計画でスケジュールを作成する研究もあるが([1]など)、ある程度の余裕時間を持たせ、かつ、手術間の制約も考

実際のスケジュール



再スケジュール

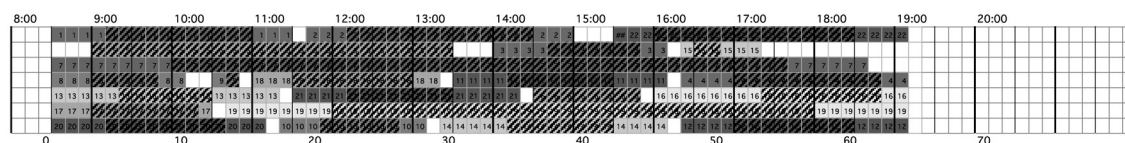


図4 1日の手術のガントチャート

慮したスケジュールを作成すると、実際のスケジュールとあまり変わらず1日の手術のスケジュールはほぼ最適になされていることがわかる。つまり、各日のどの部屋でどの手術を行うかを決定しさえすれば、状況に応じて担当者がスタッフや部屋、機材の制約や術式による順序制約などを考慮して手術のスケジュールを作成することは、さほど困難ではないといえる。そこで、本研究では、1週間のなかで、どの部屋で何曜日にもどの手術を行うかを決定する問題に焦点を当てる。

3. 手術室割当

手術室のスケジュールは、あらかじめ定められている手術室使用予定に大きく影響されている。この手術室使用予定の影響を調べるために、まず、手術室使用予定に基づいて1週間分の手術をスケジュールしたとき、どの曜日にどの手術を割り当ててもよいとしたときのスケジュールとを比較する [7]。

以下、スケジュール対象日の集合を D 、手術室の集合を R とし、日 $d(d \in D)$ の部屋 $r(r \in R)$ に割り当てられた手術の集合を $X(d, r)$ とする。手術 s の入室から退室までの時間 t_s がわかっているときに、日 d の部屋 r の手術合計時間 $\sum_{s \in X(d, r)} t_s$ のばらつきが少なくなるように手術を割り当てる。手術室ごとの手術合計時間のばらつきが少なくなれば、日 d ごとの最大手術合計時間 $\max_{r \in R} \sum_{s \in X(d, r)} t_s$ も小さくなり、手術完了時刻が早められると期待できる。

1週間分の手術のスケジュール作成に対し、今泉ら [5] は 0-1 整数計画問題として解く方法に成功しているが、ここでは、Hans ら [2] に基づき、手術時間の長い順に条件を満たす部屋に割り当てるヒューリスティックを用いる。

ステップ 0 手術を手術時間の長い順に「手術リスト」に格納。すべての $d \in D, r \in R$ で $X(d, r) = \emptyset$ とする。

ステップ 1 手術リストが空なら終了。そうでなければ、手術リストの先頭から z 個の手術を取り出し、「候補リスト」に加える。手術リストにある手術が z 個未満のときは、残りすべてを「候補リスト」に入れる。手術リストが空ならば、終了。

ステップ 2 候補リストから任意に手術 $\tilde{s}$ を取り出し、割当可能な日・部屋のなかで、 $\sum_{s \in X(d, r)} t_s$ が最小である日と部屋のペア $(\tilde{d}, \tilde{r})$ を求め、 $X(\tilde{d}, \tilde{r})$ に $\tilde{s}$ を加える。

ステップ 3 候補リストが空でなければ、ステップ 2 を繰り返す。候補リストが空になったら、ステッ

プ 1 へ。

以上のステップを 500 回繰り返し、そのなかで最良解を出力する。[2] は、手術時間のばらつきに対して強固なスケジュールを得るために手術ごとの手術時間の期待値と標準偏差を用いているが、今回のデータからは手術時間の標準偏差は得られなかったために、実際の時間を用いている。

ステップ 2 の割当可能な日・部屋は、

方針 A 手術室使用予定に従い割り当てる

方針 B 曜日の制限は設けず、各診療科の手術可能な部屋に割り当てる

方針 C 緊急用に手術を割り当てない部屋を1日1部屋準備し、割当方針 B に従う

の3通りを用いる。本モデルでは午前／午後を区別しないために、手術室使用予定に従うときは、1つの手術室を2つの診療科で使用可能であるとみなした。また、内科、神経科、皮膚科の手術については数が非常に少ないために、どこに割り当ててもよいとした。手術室使用予定で終日フリーの部屋には、手術数の少ない3診療科（内科、神経科、皮膚科）のみ割当可能とした。

さらに、手術時間の長いものから割り当てるというアルゴリズムの特性上、比較的時間が短い眼科と形成外科の手術は、最後に割り当てられる傾向にある。そのため、方針 C では、緊急用に手術を割り当てないとした部屋のみがこれらの診療科が使用可能な部屋となってしまう、スケジュール不可能となるケースが生じる。そこで、方針 C に限り、ある日に手術を割り当てられていない部屋が残り2部屋になり、かつ、そのどちらかが眼科か形成外科の使用可能部屋であるとき、その日の空いている部屋に割り当てられるのは眼科か形成外科のみという制約を加えている。

図 5 に示す 1 週間分の実際の手術データ（緊急は除き、定時の手術のみ）を用いてスケジュールした結果を図 6～8 に示す。これらのグラフは、曜日・部屋ごとに割り当てられた手術の時間の積み上げグラフである。方針 A では実際のデータよりも手術合計時間のばらつきが大きくなり、最大手術合計時間も大きくなる傾向にあるが1部屋1診療科となった。この結果より、当日のスケジュール調整により空いている部屋で可能な手術を行い効率的に運用していることが伺える。方針 B では全体的に最大手術合計時間を小さくすることができている。また、方針 C では、手術を割り当てない部屋を設ける分、方針 B よりも最大手術合計時間が大きくなっているが、手術室ごとの手術合計時間のば

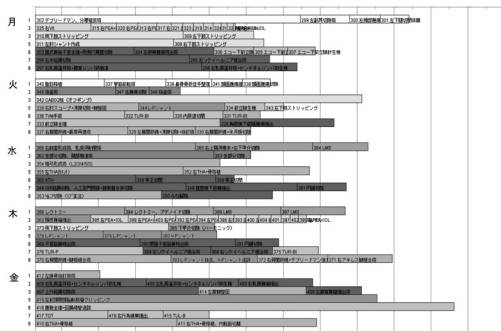


図 5 実際の手術データの時間積み上げグラフ

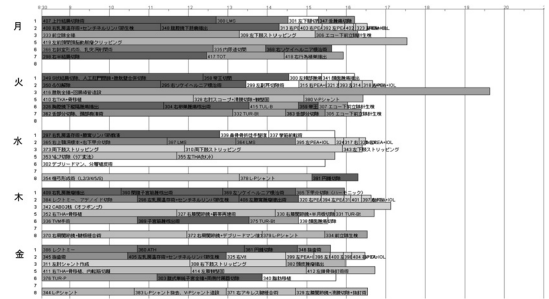


図 8 方針 C で割り当てたときの時間積み上げグラフ

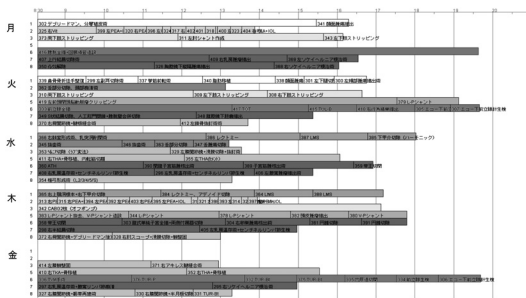


図 6 方針 A で割り当てたときの時間積み上げグラフ

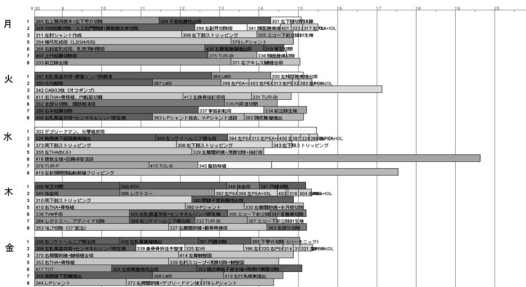


図 7 方針 B で割り当てたときの時間積み上げグラフ

らつきが小さく押さえられており、運用上は好ましいと考えられる。

この割当では、スタッフ制約や機材制約が考えられておらず手術開始時刻などは与えていないが、手術室やスタッフを増やしたときの影響などを測るときには効果を発揮する。

4. 手術室使用予定の組替え

前節で確認できたように、手術室スケジュールはあらかじめ定められている手術室使用予定の影響を大きく受ける。そこで、手術室使用予定の組替えによる効果を検証する。組替え時には、スタッフ制約は考慮せず、どの診療科もいずれの曜日・時間帯にも手術可能とする。また、部屋制約は、あらかじめ決められてい

る各診療科の手術可能な部屋のみを割り当てるようにする。ただし、整形外科の部屋の使用は術式に依存するために、部屋の移動はなしとする。この組替えの問題は、割当問題に曜日ごとの最大手術合計時間の制約を加えた整数計画問題として解くことができる。

(曜日×時間帯×手術室)の組合せの要素、つまり、手術室使用予定表の各セルを『コマ』と呼ぶ。8カ月の手術データを利用して、各コマに現状で割り当てられている診療科が実施した手術の1コマ平均手術時間(入室から退室までの時間)をそのコマに対応する診療科の手術時間として用いる。ただし、入室時間により午前と午後を区別する。また、コマに割り当てられている診療科と異なる診療科による手術の手術時間が長い場合、そのコマの割当診療科を変更する。以上から得られる各コマの平均手術時間は、割当の診療科以外の手術時間は含まれていないために実際の平均手術時間よりは短い。特定の診療科に割り当てられていないフリーのコマは、そのコマに行ったすべての手術の平均手術時間を用いる。

結果を図9に示す。図9は、曜日、部屋ごとの平均手術時間のグラフであり、濃い色が午前、薄い色が午後を表す。診療科ごとに塗りつぶしパターンを変えている。実績では、火・水曜日の手術時間が長く、また、room3の手術時間が長くなる傾向にある。グラフ中の数値は、曜日ごとの最大平均手術時間を表す。日ごとの最大平均手術時間の和を最小化する組替えの結果、7つのコマの予定診療科が入れ替えられ、最大平均手術時間の和が143分改善された。このことより、外来診察日を変更するなどして、手術室使用予定を組替えることで最終完了時刻がわずかに早められる可能性があることがわかった。

実際には、週明けの月曜日に手術可能な患者が限られていること、曜日によってはスタッフの勉強会があることなど細かい制約が加わるが、これら曜日ごとの

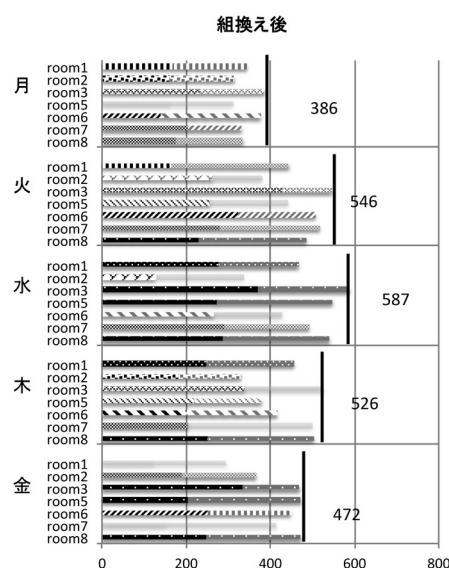
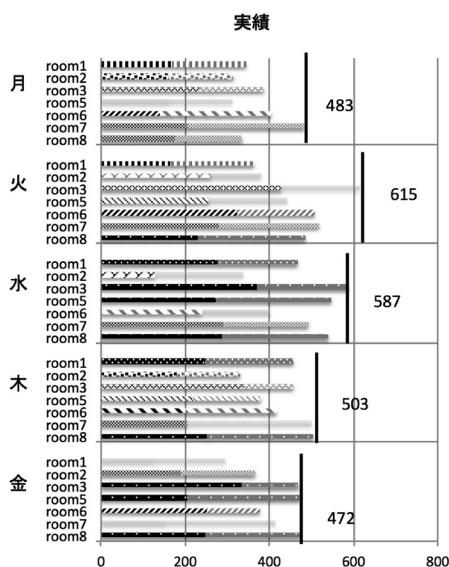


図 9 平均手術時間グラフ

制約は簡単に組み込める。また、午前午後で連続して行う手術は今回のデータではすべて午前となっているが、このような長時間の手術が多い診療科のために午前午後連続の枠を設けるなどのモデルの改善が必要といえる。

5. 機材制約の考慮

最後に機材制約の影響について考えよう。3節で述べた手術室割当では、機材制約は考えられていない。そこで、1日に割り当てられた手術を対象に、機材制約を満たすように手術開始時刻を決定する問題を最適化

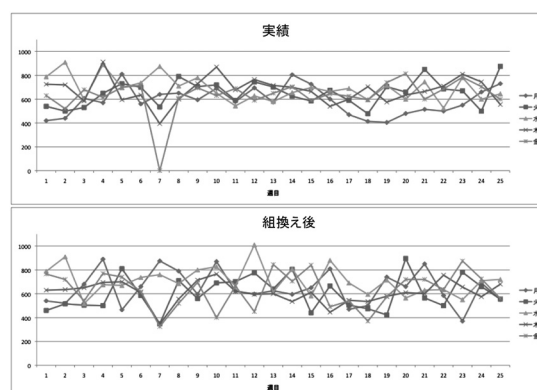


図 10 手術室使用予定組替え前後での週ごとの最大手術合計時間

問題として扱う [6]。手術室割当てで得られた最大手術合計時間 $\max_{r \in R} \sum_{X \in X(d, r)} t_s$ をその日の最終完了時刻とし、最終完了時刻を満たし、手術室は割り当てられた部屋に固定したなかで、同一の機材を使用する手術の時間の重なりを最小とするように各手術の開始時刻を求める。

対象とする機材は、主要な 5 種（超音波凝固切開装置、画像診断装置、電気式止血器、自己血回収輸血器、医療用カメラ・モニタ）とした。100 日分をスケジュールしたところ、画像診断装置と自己血回収輸血器を使用する手術時間が重複することはなかった。これは、これらの機材を使用する手術数が少ないためと思われる。超音波凝固切開装置と電気式止血器、医療用カメラ・モニタに対しては、これらを使用する手術の重複時間がかかなり長くなるケースも見られた。また、1 週間のなかで、全く重複がない日と合計で延べ 500 分近く重複が生じる日が混在するケースもあり、機材制約が重要である場合には、手術室割当の段階での考慮が効率的な運用につながるといえる。

6. 手術室スケジューリングの課題

今回紹介した事例では、すべて過去に行った手術時間のデータを用いているが、現実には、予定の終了時刻が前後することが多い。そのため、多くの手術データを集め、手術時間の期待値と標準偏差を用いてスケジュールを行い、実際の運用での効率を検証することが第一といえる。また、診療科ごとに手術時間の分布に大きな違いがある。よって、4節で行った平均手術時間を用いた手術室使用予定の組替えは、その結果を注意深くみるべきである。実際、組替え後の使用予定表に基づいて、各週で行われた手術を割り当てた場合の

最大平均手術時間を観察すると、かなりばらつきがあることもわかる (図 10)。今後は、診療科ごとの手術時間の特性もモデルに組み込むことが望まれる。さらに、機材に関しては、手術全体を通して使う機材と手術中一時のみ使う機材があり、現場では、機材の滅菌時間も考慮して手術の開始時間を決定することもある。これらをモデルに組み込めば、スケジュール段階における人的ミスを減らすことができると考える。そして、実用化に向けては、スタッフ制約、特に、麻酔医や看護師のスケジューリングとの連動も重要といえる。

日本の病院は今後さらに病床運用の効率化を求められることを考えると、病床管理の効率化は急性期病院が DPC (診断群類別包括評価) 制度の基に病院運営を行っている限り、手術室のスケジューリングと密接な関係にある。そして、手術室スケジューリングの効率化は医師の外来勤務スケジュールとも関係してくる。これら一連の関係を連動させた最適化を図ることは病院業務のマネジメントを効率化させるものと考ええる。

参考文献

- [1] B. T. Denton, A. Miller, H. Balasubramanian, and T. Huschka, Optimal Surgery Block Allocation Under Uncertainty, *Operations Research*, **58**, 802–816, 2010.
- [2] E. Hans, G. Wullink, M. van Houdenhoven, and G. Kazemir, Robust Surgery Loading, *European Journal of Operational Research*, **185**, 1038–1050, 2008.
- [3] J. H. May, W. E. Spangler, D. P. Strum, and L. G. Vargas, The Surgical Scheduling Problem: Current Research and Future Opportunities, *Production and Operations Management*, **20**, 392–405, 2011.
- [4] P. S. Stepaniak, R. A. C. van der Velden, J. van de Kiundert, and A. P. M. Wagelmans, Human and Artificial Scheduling System for Operating Rooms, R. Hall (ed.), *Handbook of Healthcare System Scheduling*, 155–175, 2012.
- [5] 今泉隆徳, 伊東美奈, 鈴木敦夫, 藤原祥裕, 小林千尋, 手術室のスケジューリング支援システムの試作, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2013 年春季研究発表会アブストラクト集, 70–71, 2013.
- [6] 長野浩太, 機材制約を考えた手術室スケジューリングモデルの作成, 筑波大学理工学部社会工学類卒業論文, 2012.
- [7] 若林むつみ, 手術室割当問題に対するアルゴリズムの提案と検証, 筑波大学理工学部社会工学類卒業論文, 2012.