

令和 元年 9 月 9 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01253

研究課題名(和文) 多段階確率計画問題に対する効率的解法の開発と社会システムへの応用

研究課題名(英文) Development of an efficient solution method for multistage stochastic programming problems and its application to social systems

研究代表者

椎名 孝之 (Shiina, Takayuki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90371666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：数理計画法や最適化手法は現実の様々な分野に応用されている。現実の多くの問題は、確定的ではなく変動要因を含む。特にスケジューリングあるいはサプライチェーンマネジメントなどの分野では、作業時間や需要などは常に変動するものである。このような状況を取り扱う確率計画法に対する理論および解法の研究が必要であり、これまでに基本的な個別問題に対応した解法の研究を行ってきたが、効率的に解析する方法はまだ十分に研究されていない。本研究では確率計画法の理論的な側面の研究を行い、エネルギーや、投資決定とサプライチェーンマネジメントあるいはスケジューリングの問題に対して、効率的な解法を開発することを目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在では確率計画法の理論と解法アルゴリズム、またこれらを実装する計算機の発展により、実用的な規模の問題を解くことも可能になりつつある。これまでに特定の問題に対しては、確率計画法の基本的な解法アルゴリズムを開発することに成功しているとはいえ、統一的に取り扱う手法が必要である。確率計画問題に対しては、線形計画法はもちろん非線形計画法や整数計画法、さらには確率モデルなどオペレーションズ・リサーチにおける異なる分野の手法が総合的に応用されることも多い。このように様々な理論や手法の集大成であるという点からも、また現実問題への応用を考慮するという点からも、手法の応用を考えていくことが必要である。

研究成果の概要(英文)：Mathematical programming and optimization methods are applied to various fields in reality. Many real problems involve variables that are not deterministic. In particular, in the fields of scheduling or supply chain management, work time and demand are always fluctuating. Although research on theoretical and solution methods for stochastic programming to handle such situations is necessary, and research has been conducted on solution methods corresponding to fundamental individual problems so far, efficient analysis methods are still sufficient Not studied. In this study, we study theoretical aspects of stochastic programming, and aim to develop efficient solution methods for energy, investment decision and supply chain management or scheduling problems.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：数理計画法 最適化 確率計画法 整数計画法 不確実性 需要変動 エネルギー スケジューリング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

様々の分野で発生する現実の数理計画問題では、不確実な状況下での意志決定を行わなければならない。不確実要素を直接モデルに組み入れた最適化手法は、確率計画法(stochastic programming)と呼ばれている。特にサプライチェーンマネジメントおよび在庫管理、運輸、投資決定あるいはエネルギー分野などにおいては、不確実な状況下での意思決定やリスク管理手法が重要であるため、理論と手法のより一層の進展が求められている。

確率計画法は、数理計画法の創始者である Dantzig らの 1950 年代の研究に起源を有する。確率計画法に関しては、多くの研究が行われているが、多段階の大型問題、確率的整数計画などの組合せ条件を含む問題、各種のリスク尺度を含む非凸計画問題などは取り扱いが難しく、今後の課題として残されている。

確率計画問題の特徴としては、多数のシナリオを考慮することにより大規模問題を解くことが求められるということがあげられる。現在では確率計画法の理論と解法アルゴリズム、またこれらを実装する計算機の発展により、実用的な規模の問題を解くことも可能になりつつある。これまでにいくつかの問題に対しては、確率計画法の基本的な解法アルゴリズムを開発することに成功している。また確率計画法自体が数理計画法の応用分野であるということがいえる。確率計画問題に対しては、線形計画法はもちろん非線形計画法や整数計画法、さらには確率モデルなどオペレーションズ・リサーチにおける異なる分野の手法が総合的に応用されることも多い。このように様々な理論や手法の集大成であるという点からも、また現実問題への応用を考慮するという点からも、手法の応用を考えていくことが必要である。

### 2. 研究の目的

数理計画法や最適化手法は現実の様々な分野に応用されている。現実の多くの問題は、確定的ではなく変動要因を含む。特にスケジューリングあるいはサプライチェーンマネジメントなどの分野では、作業時間や需要などは常に変動するものである。このような状況を取り扱う確率計画法に対する理論的および解法の研究が必要であり、これまでに基本的な個別問題に対応した解法の研究を行ってきたが、これらを効率的に解析する方法はまだ十分に研究されていない。本研究では確率計画法の理論的な側面の研究を行い、金融投資、投資決定とサプライチェーンマネジメントの問題に対して、市場変動をより正確に表現できるモデリング手法を検討し、これらのモデルに対する効率的な解法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 確率計画法の理論、解法アルゴリズムの研究

多段階確率計画問題および、整数条件を有する確率計画対象として、既存研究の調査と問題点の検討を行う。従来法では、システムの状態を固定したうえで、変動に対応するような手法が用いられてきた。このモデルは、電源計画などの設備の拡張計画などに応用されている。しかし、確率的な変動は、システムの状態にまで影響を与えることがある。継続する段階を考慮した遅延や、在庫量などの変動がこのような状況に相当する。そのため、継続する変動を連鎖的に近似するような手法を用いることによって、システム全体の解析を効率的に行う手法を開発する。本研究では、追加費用も変動に従うより一般的な問題を取り扱うことを目標とする。

#### (2) 制約の非線形性を考慮したネットワーク設計などのモデリングと計算方法

電力供給ネットワークにおいて、潮流を制御する機器の最適設置問題は数理計画問題となる。この問題では、需給断面を入力条件として、ネットワークの運用制約を解消するためのコスト最小の設置を決定する。このときのネットワーク運用制約としては、電圧運用幅、線路熱容量が考慮できる。しかし、大規模システムにおける最適化を行う場合や多断面の潮流制約を考慮する場合、最適化問題に含まれる変数や制約の数が膨大になる。そのため最適化手法の効率化が求められている。最適設置については、設置点の探索と容量の決定を 2 段階で行うことにより、組合せ最適化と非線形最適化の混合問題を解く手法が考えられる。この手法によると、設置の局所探索では、実行可能な潮流が存在しない場合が多く、効率的に探索を行えない。そのため、局所探索によらず設置費用を線形近似する新たな手法を示す。線形近似手法は、固定費を含む目的関数を線形近似するもので、設置を表す 0-1 変数を含まないため常に実行可能な潮流の値が得られるという利点を有する。

#### (3) スケジューリングなどの最適化問題への応用

様々な試合もしくは大会を行う際、予めスケジュールを決める必要がある。競技などの種類によっては、雨天などによって試合が中止になることも考慮しなければならない。スケジュールの作成において、すべてのチームに対する公平性を保証する必要がある。公平性の測り方には様々な指標が考えられるが、本研究ではチーム間の未消費試合数の差に基づいたスケジュールの作成について考察する。様々なリスク尺度を考慮し、最適解を求め、効率的な運用方策の有効性の検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 多段階ネットワーク拡張計画の最適化

本研究では、鉄道への多期間にわたる投資決定問題を対象とする。顧客の交通需要は確率変数に従うものと定義し、鉄道ネットワークを拡張する計画を考える。鉄道のネットワークにおける区間容量は、区間の長さ、待避線の有無、信号の数、平均速度などに依存する。それぞれのリンク(区間)に対し、待避線を何本設置するか、信号機をいくつ設置するか、複線を引くかの組み合わせが容量拡張の選択肢となる。この多期間計画では、どの区間をいつ拡張するかを考え、需要変動を考慮して期間ごとの費用の総和の期待値を最小化する。この問題は、多期間の容量拡張問題であり、初期段階の決定では、続く期間において実行可能解が求まらない可能性がある。確率計画においては、このような状況を回避するために、実行可能性カットとよばれる妥当不等式を制約に追加することがよく行われる。しかし、このような新たな制約を生成することは主問題の解を用いて、子問題を解く際にその子問題が実行不可能となることを意味する。子問題が実行不可能であることはその問題の双対問題が無限解を有するため、その無限方向を制限する制約が実行可能性カットである。このような手続は、解法において効率的でないため、図のように実行不可能な解が得られないようなペナルティを設定する手法を開発した。

問題においては、交通需要を満たすようにネットワークにおけるリンクの容量を設定するが、容量が十分でない場合、全ての需要を満たすことができない。需要の未達成量に比例するようなペナルティを考えて、ペナルティ値が容量拡張を行う費用よりも高くなるように設定すれば、実行不可能(需要未達成量が存在する)な解は得られないことになる。

鉄道分野の問題に対しては、L-shaped 法を用いることで計算時間を短縮することを可能にした。このようなネットワーク設計問題へ確率計画法を応用する場合、多期間の問題を扱わなければならない、大規模な整数計画問題を解かなければならない。特に将来の需要の変動を考慮するとき、後の決定は初期決定に依存するため、初期決定の実行可能性を保証することが大きな問題である。本研究では、後の決定で必ず実行可能解が得られるような数理計画モデルの定式化を行い、実際に問題を解くための手法を開発した。

### (2) エネルギー供給のネットワーク設計問題

エネルギー供給のネットワーク設計問題については、電力の制御を行う装置の設置を設備投資計画の中で扱わなければならない。この設置を設備投資計画の中で扱う場合、ネットワークの運用制約や電力品質要求を満足することを条件に、投資コストを最小にする設置箇所と容量の決定が必要となる。

設置最適化手法を高速化し、多断面の制約を考慮可能とすることにより実用性を高める。設置点の探索と最適潮流計算の両者を繰り返し行う既開発の設置最適化手法では、制約違反を解消できない設置パターンに対しても最適潮流計算を行うことが計算時間を増加させる要因となっていた。

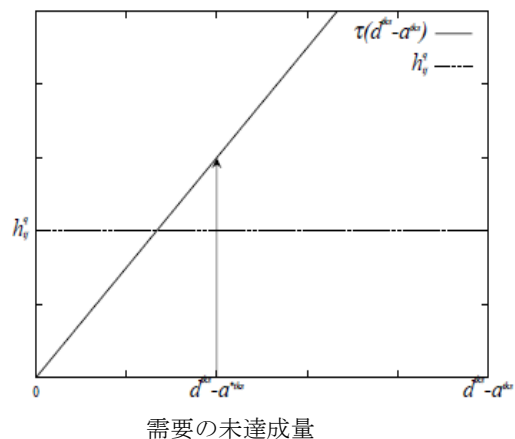


図 1：実行不可能性へのペナルティの設定

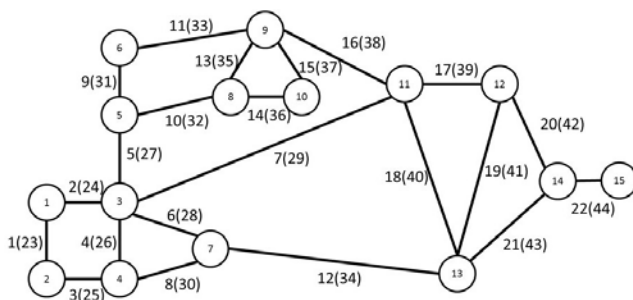


図 2：ネットワーク例

表 1：L-shaped 法による効率化

シナリオ数	従来法計算時間(s)	新手法計算時間(s)
32	25	95
243	344	29
1024	2875	1067
3125	14272	4131

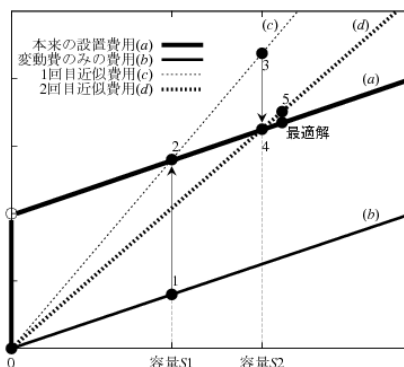


図 3：近似手法による解法

探索法を工夫しても、最適潮流計算の実行回数を低減させることが困難であるため、効率的に最適解を求めることはできない。そのため局所探索によらず機器の設置費用を線形近似する新たな手法を示した(図1)。線形近似手法は、固定費を含む目的関数を線形近似するもので、設置を表す0-1変数を含まないため、常に実行可能な潮流の値が得られるという利点を有する。この手法によれば、必要最小限の最適潮流計算の実行により求解可能となるため、高速化が実現できる。上記開発手法の性能を実規模の配電モデルシステムを用いて検証した。

上記開発手法の機能を拡張し、複数の需要シナリオを同時に考慮した最適化が行えるように、確率計画問題へ拡張した。モデルシステムを用いた機能検証の結果、複数断面を扱う場合でも、計算時間は従来法の1/10程度となる。

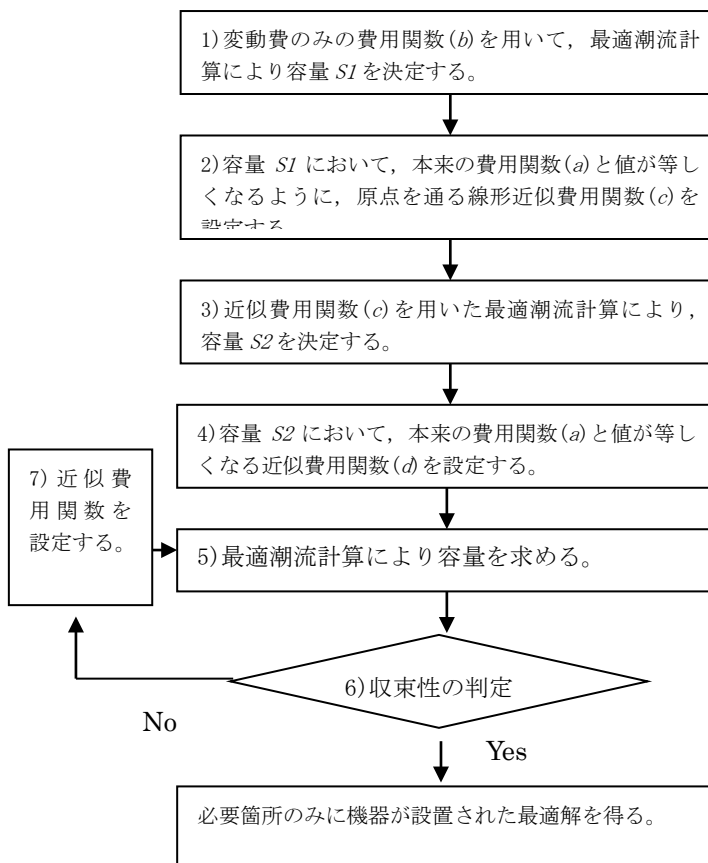


表 2 計算結果とモデルシステム条件

シナリオ数	単一		複数	
	従来法	提案法	従来法	提案法
最適潮流計算を実行した回数 (単一の場合は、個別に解いた平均)	59	4	74	6

### (3) スケジューリング問題への応用

スポーツスケジューリングでよく扱われる状況が、全てのチームが他のチームと1度ずつ戦う single round-robin schedule や他のチームと2度ずつ(ホーム&アウェイ)戦う double round-robin schedule である。特に double round-robin schedule は Jリーグ1部における年間通しての日程などで採用されている。本研究ではセ・リーグの6球団(C, G, B, T, S, D)が他の球団とホーム&アウェイで12試合ずつ戦い、1球団当たり合計120試合の日程を扱う。同一球団同士の3連戦を1節と呼ぶ。各節で全ての球団は試合を行うものとする。1クールとは、他の全ての球団と1度ずつH(ホーム)&A(アウェイ)で合計10節行う試合の集合を表す。全日程120試合は4つのクールから構成される。

3.1 まずクールごとに諸々の制約を満たすスケジュールを全列挙する。スケジュール作成の方法は、以下の手順で行った。パターン生成部では、ある1球団の10節分(1クール分)のH(ホームゲーム)、A(アウェイゲーム)の組合せについて以下の制約を満たすものを全列挙する。続いてHAT(ホームアウェイテーブル)生成を行う。HATとは、各球団について各日程の試合がHであるかAであるかをまとめたものを指す。ここでは、パターン生成部で生成された全パターンから6つ(6球団分)を選んでHATを作成する。HATとなる必要条件としては、各節が3つのH、3つのAで構成される必要があり、この条件を満たすものを全列挙する。HATを基にして、実行可能スケジュールの作成を行う。ここでは、HAT生成部で得られた全てのHAT(第1クールにおいて352通り)に対して、それぞれに対応する実行可能スケジュールを全て列挙する。それぞれのHATの6つのパターンに対して、実際の球団名は割り当てずに仮の球団名(1~6)を割り当てる。0-1整数計画問題を解いて、実行可能スケジュールを作成する。

3.2 得られた実行可能スケジュールをもとに、球団名割り当てに移る。実行可能スケジュールに対して、球団間の未消化試合数差を最小化するような球団名割り当てを行うのは2次割り当て問題であり、難しい問題である。よって作成された全ての実行可能スケジュールについて、仮球団(1, ..., 6)に球団名を全列挙法で割り当てる。まず以下の制約を満たすものを列挙する。

(i) 各仮球団に球団名を1つずつ割り当てる

(ii) (第1クールのみ) 第1節は2年前の3位以上の球団(S, G, T)のホームで行う

3.3 未消化試合の解析については、最近10年間(2007-2016)のデータを基に、作成したそれぞれのスケジュールを消化したときに、該当クールで中止になる試合数の期待値を球団別に求め

た。クール毎にスケジュール作成と未消化試合の解析を行ったが、ここでは第 1~4 クールのスケジュールを繋ぎ合わせて最適なスケジュールを決定する。各クールのスケジュールを繋ぎ合わせ 10004 通りのスケジュールが列挙される。但し以下の条件を満たすスケジュールのみを許可する。

- ・どの球団も 3 連続 H, 3 連続 A になることがない。
- ・連続する節で同じ相手と試合する球団がない。
- ・1 節空けて再度同じ相手と試合する球団がない。

以上の結果、538,082 通りのスケジュールが生成された。それぞれのスケジュールについて球団毎の未消化試合数の期待値を求める。そして各スケジュール毎にこの値の最大値と最小値の差(=レンジ)を求め、この差が最も小さいスケジュールを最適とする。

本研究では、実際の日程と比較して確率的に全体の未消化試合数を抑えるとともに、レンジ(期待値の最大値と最小値の差)も抑えることができた。

表 3 スケジュールリングにおける計算結果

球団	C	G	B	T	S	D	レンジ
本研究(レンジ最小)	4.843	2.805	4.932	4.784	4.897	3.136	2.127
本研究(全球団改善)	4.879	2.932	5.013	4.805	4.911	2.858	2.155
実際の日程	5.694	3.299	5.724	5.587	5.714	3.036	2.688

スポーツスケジュールリングの問題に関しては、スケジュールの作成においてすべての球団に対する公平性を保証する必要がある。公平性の測り方には様々な指標が考えられるが、本研究では球団間の未消費試合数の差に基づいたスケジュールの作成について考察した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

[1] 今泉 淳, 椎名 孝之, 鉄道の休日ダイヤに対する車両運用計画のための列生成アプローチ, スケジュールリングシンポジウム論文集 2018, 2018 年

[2] Takayuki Shiina, Design of distribution network using power flow controller, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 12(3) 2018

[3] Takayuki SHIINA, Tomoaki TAKAICHI, Yige LI, Susumu MORITO, Jun IMAIZUMI, Multistage stochastic programming model and solution algorithm for the capacity expansion of railway network, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 12(3) 2018

[4] 星野 怜旺, 椎名 孝之, 森戸 晋, 今泉 淳, プロ野球の試合において雨天中止の可能性を考慮したスケジュールの作成 -2017 年セ・リーグ公式戦日程の場合-, 知能と情報 30(4) 652-657 2018

[5] Susumu Morito, Naoto Fukumura, Takayuki Shiina, and Jun Imaizumi, ROLLING STOCK ROSTERING OPTIMIZATION WITH DIFFERENT TYPES OF TRAIN-SETS, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017 4-9 2017 年

[6] 椎名 孝之, MULTISTAGE STOCHASTIC PROGRAMMING MODEL FOR THE CAPACITY EXPANSION OF RAILWAY NETWORK -SOLUTION ALGORITHM BASED ON THE L-SHAPED METHOD-, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017 141-146 2017 年

[7] Takayuki Shiina, OPTIMAL LOCATION PROBLEM FOR THE INSTALLATION OF POWER FLOW CONTROLLER, Pesquisa Operacional 37(3) 509-524 2017 年

[8] Yuuta Morooka, Naoto Fukumura, Takuya Shiina, Jun Imaizumi, and Susumu Morito, Rolling Stock Rostering Optimization Based on the Model of Giacco et al.: Computational. Evaluation and Model Extensions, Proceedings of RailLille2017 709-725 2017 年

[9] 椎名 孝之, 不確実性を考慮した発電機起動停止法, スマートグリッド 57 8-12 2016 年

[10] Susumu Morito, Yuho Takehi, Jun Imaizumi, and Takayuki Shiina, Optimization Models for Multi-period Railway Rolling Stock Assignment, Combinatorial Optimization 4th International Symposium, ISCO 2016 393-402 2016 年

[11] Takayuki Shiina, Multistage stochastic programming model for optimizing allocation of running time supplements, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 10(3) 2016 年

[12] 椎名孝之, 揚原由統, 今泉淳, 森戸 晋, 確率計画法に基づく列車の余裕時分配分最適化 日本応用数学会論文誌 26 307-317 2016 年

[学会発表] (計 26 件)

[1] 北村拓海, 佐藤哲也, 今泉淳, 椎名孝之, トレードオフを考慮したプロジェクトスケジュールリング問題 に対する確率計画モデルと解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 2019

[2] 荒金弘司, 佐藤哲也, 椎名孝之, 貸出と返却を考慮した在庫融通問題の多期間確率計画モデル, 日本オペレーションズ・リサーチ学会, 2019

[3] 木俣 翔太, 佐藤 哲也, 椎名 孝之, 所 健一, 住宅における蓄エネルギー機器の最適運転計

画, 日本経営工学会, 2019

[4] 永倉 英治、霍 艶麗、佐藤 哲也、椎名 孝之, 投資ポートフォリオ決定におけるバリュー・アット・リスク最適化問題の効率的解法, 日本経営工学会, 2019

[5] 荒金 弘司、椎名 孝之、佐藤 哲也, 確率計画法による貸出と返却を考慮した在庫融通問題, 日本経営工学会, 2019

[6] Takumi Kitamura, Takayuki Shiina, Solution Algorithm for Time/Cost Trade-off Stochastic Project Scheduling Problem, OR2018 2018年9月

[7] 今泉 淳, 椎名 孝之, 列生成法による鉄道車両の休日運用の作成, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会 2018年9月

[8] 中野 颯大, 今泉 淳, 椎名 孝之, 鉄道車両運用計画の定式化に対する相互直通運転の拡張 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会 2018年9月

[9] 今泉 淳, 椎名 孝之, 鉄道の休日ダイヤに対する車両運用計画のための列生成アプローチ, スケジューリングシンポジウム 2018 2018年9月

[10] Shuichi Isomura, Tomoki Fukuba, Takayuki Shiina, Algorithm for vehicle routing problem under uncertainty, EURO2018 2018年7月

[11] Tomoki Fukuba, Shuichi Isomura, Takayuki Shiina, Energy plant operation and installation plan via stochastic programming, EURO2018 2018年7月

[12] 福場 智紀, 椎名 孝之, 所 健一, エネルギープラント運用及び導入計画の確率計画法による最適化, 電気学会システム研究会 2018年6月

[13] 手塚 洗佑, 椎名 孝之, 分割を許す配送計画問題の列生成法による解法, 日本経営工学会春季大会 2018年5月

[14] 出井 雅人, 椎名 孝之, 電力のスポット価格の変動を考慮したエネルギープラントの運用計画, 日本経営工学会 2018年5月

[15] 福場 智紀, 椎名 孝之, 所 健一, 確率計画法によるエネルギープラント運用及び導入計画, 日本経営工学会春季大会, 2018年5月

[16] Takayuki Shiina, Jun Imaizumi, Susumu Morito and Chunhui Xu, Optimization problem for power flow controller, 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies

[17] Chunhui Xu, Yanli Huo and Takayuki Shiina, Portfolio selection with unfixed investment timings, 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies

[18] Takayuki Shiina, Jun Imaizumi, Susumu Morito, Solution Algorithm for Capacity Expansion Problem on Networks, OR2017 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPERATIONS RESEARCH

[19] 小出 翼, 北村 拓海, 椎名 孝之, 森戸 晋, 今泉 淳, 需要の不確実性を考慮したロットサイズ決定問題, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018年春季研究発表会

[20] 高市 智章, 李宜格, 椎名 孝之, 森戸 晋, 今泉 淳, 鉄道ネットワーク拡張問題に対する確率計画法の応用, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会 2017年

[21] 岡紗 百合, 椎名 孝之, 森戸 晋, 資源制約を有するプロジェクトスケジューリング問題の解法, 日本経営工学会秋季大会 2016年

[22] 高市 智章, 椎名 孝之, 森戸 晋, 今泉 淳, 鉄道のネットワーク投資問題に対する確率計画法の応用, 日本経営工学会秋季大会 2016年

[23] T. Shiina, J. Imaizumi, S. Morito, C. Xu, Optimization Problem for Installation of Power Flow Controller, 2016 Conference on Complex Systems 2016年

[24] 諸岡 祐太, 福村 直登, 椎名 孝之, 今泉 淳, 森戸 晋, 鉄道車両運用計画における交番作成の数理計画モデル, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会 2016年

[25] S. Morito, J. Imaizumi, M. Miura, T. Shiina, A Column Generation Approach to Multi-period Railway Rolling Stock Assignment, International Conference on Operations Research 2016

[26] T. Shiina, J. Imaizumi, S. Morito, C. Xu, Optimization Problem for the Installation of Equipment to Control Power Flow, International Conference on Operations Research 2016 [図書] (計 1 件)

Xu, Chunhui, Shiina, Takayuki (共著), Risk Management in Finance and Logistics, Springer 2018年8月

[その他]

ホームページ等 椎名研究室 <http://www.shiina.mgmt.waseda.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

椎名 孝之, 所属研究機関名: 早稲田大学, 部局名: 理工学術院, 職名: 教授, 研究者番号: 90371666

### (2) 研究分担者

徐 春暉, 所属研究機関名: 千葉工業大学, 部局名: 社会システム科学部, 職名: 教授, 研究者番号: 70279058

今泉 淳, 所属研究機関名: 東洋大学, 部局名: 経営学部, 職名: 教授, 研究者番号: 00257221