

## 学位論文及び審査結果の要旨

横浜国立大学

氏 名	朱希徳 (Xide Zhu)
学 位 の 種 類	博士 (経営学)
学 位 記 番 号	国府博甲第 37 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 31 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠	学位規則 (昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号) 第 4 条第 1 項及び 横浜国立大学学位規則第 5 条第 1 項
研究科 (学府)・専攻名	国際社会科学府 経営学専攻
学 位 論 文 題 目	Bilevel Programming Approaches to One-Shot Decision Problems and Their Applications
論 文 審 査 委 員	主査 横浜国立大学 教授 郭 沛俊 横浜国立大学 教授 秋山 太郎 横浜国立大学 教授 田名部元成 横浜国立大学 准教授 成島 康史 横浜国立大学 准教授 無藤 望

## 論文の要旨

In many decision problems, we often encounter a situation where decision-makers have one and only one opportunity to make a decision. Such decision problems are called one-shot (one-time) decision problems. The one-shot decision problem is an important decision problem, which arises in various areas of social production and living activities interested in short-term benefits. In general, a decision problem contains a set of alternative actions and each of which corresponds to a set of possible states of nature. For each alternative, one and only one state will happen in the future, resulting in an outcome associated with that decision.

When making decisions in practice, decision-makers may face three different decision conditions: certainty, risk and uncertainty. Certainty is for the situation where the state is unique for each alternative. In this situation, since the outcomes of all alternatives are accurately known, the decision-makers can choose the best decision or at least they can choose an alternative that generates the best outcome. Obviously, certainty is an ideal condition for decision-making. However, in practice, lots of decision problems always involve risks or uncertainties. More specifically, risk involves the situation where the probability of every possible state is known, under which the decision-makers can exactly calculate the probabilities of all possible outcomes. Uncertainty is for the situation where the decision-makers know all possible states related to every alternative but they do not obtain exact probabilities of them due to limited information.

Different decision situations, especially involving risks and uncertainties, require different decision theories, among which the expected utility theory of von Neumann and Morgenstern (1944) and the subjective expected utility theory of Savage (1954) have almost been regarded as a normative theory for rational choice under risk and uncertainty, respectively. However, plenty of hypothetical experiments show that people's preferences systematically violate the axioms of these two decision theories, such as the independence in the expected utility theory and the sure-thing principle in the subjective expected utility theory; see, e.g., Allais (1953), Ellsberg (1961), Kahneman and Tversky (1979), and Starmer

(2000).

From the aspect of mathematical optimization, decision problems under risk or uncertainty are usually modeled using the expected value: a weighted average of all possible outcomes (or utilities defined over the outcomes) for each alternative where objective or subjective probabilities are used as weights. We can easily understand that if the process repeats over a great large number of times in the same decision circumstances, then the expected value based decision will lead to the largest average outcome. However, this largest expected value may not be obtained in the short term or if the decision is made only once. In other words, for a one-shot decision problem, it is less justifiable to use the expected value to evaluate the decision.

Another two commonly used decision approaches, especially for situations involving uncertainty, are based on the maximax and maximin criterion: the maximax approach evaluates each decision by the maximum possible outcome associated with that decision, whereas the maximin approach considers the minimum possible outcome. The maximax approach is appropriate for an optimistic decision-maker who is often attracted by the best results. The maximin approach would be suitable for a pessimistic decision-maker who is always worried about the worst results. Clearly, the maximax approach might be too daring whereas the maximin approach might be too conservative in the sense that the former only focuses on the best scenario but the latter only considers the worst scenario no matter what will happen in the future. Besides maximax and maximin criteria, the minimax regret criterion, Hurwicz criterion and Laplace criterion are also widely used in applications. Since the minimax regret approach is to minimize the worst-case regret (difference or ratio of the outcomes) rather than to minimize the outcome itself, it is sometimes not as pessimistic as the standard maximin approach. Likewise, to achieve a compromise between the optimism of the maximax criterion and the pessimism of the maximin criterion, Hurwicz criterion is proposed that is a weighted average of these two extremes. Laplace criterion applies to the situation where the decision-maker is completely ignorant about the probability of all states. In this case, the probability of each state is usually considered to be equal and the decision-maker chooses a decision by maximizing the expected outcome.

In recent years, Guo (2011) proposed the one-shot decision theory (OSDT) for one-shot decision problems under risk or uncertainty, and applied it to several problems in business and management; see, e.g., Guo (2010a), Guo (2010b), Guo and Ma (2014). Based on the OSDT, Wang and Guo (2017) built a behavioral model for explaining the anomalies in the first-price sealed-bid auctions. To the best of our knowledge, this is the first time to provide a theoretical explanation for throwing-away phenomenon for such auction problems. Recently, Guo (2017) advanced the OSDT and axiomatized the focus theory of choice (FTC) for one-shot decision-making under risk or uncertainty. OSDT and FTC are based on two basic assumptions (axioms): a decision-maker can choose the most attractive scenario (state) for him/her from among all possible scenarios for each action; a decision-maker can choose the most preferred action by comparing the salient states of all actions. These assumptions are intuitively appealing and there are indeed growing evidences supporting them; see, e.g., Bordalo et al. (2012), Busse et al. (2013), Orquin and Loose (2013), Stewart et al. (2016). OSDT and FTC are behavioral decision theories that can explain many puzzling phenomena in psychology and economics, such as the St. Petersburg, Allais and Ellsberg paradoxes.

In this dissertation, we propose new decision approaches to one-shot decision problems based on the OSDT. Different from traditional decision models, the OSDT-based decision model is a bilevel programming problem that obtains an optimal decision by the following two steps: (1) for each feasible decision variable (or vector) given by the upper level problem, the lower level problem examines every possible realization of the random variable (or vector) with considering the probability of this realization and the payoff associated with it and then

chooses one as a focus point of this decision; (2) based on the focus points of all feasible decisions, the upper level problem determines an optimal decision by considering which one coupled with its focus point can generate the highest payoff. We consider two types of behaviors of the decision-maker choosing focus points: one is choosing the scenario which has a relatively high probability and can bring about a relatively high payoff, such focus points are called active focus points; the other is choosing the scenario which has a relatively high probability but can lead to a relatively low payoff, such focus points are called passive focus points. With different preferences for choosing the focus points, the decision-makers may make different decisions.

Bilevel program is a special constrained optimization problem, whose constraints or part of constraints are defined by another optimization problem. Since bilevel program is a non-convex optimization problem with an implicitly determined feasible set, to solve it or find its optimality conditions, the problem has to be reformulated as a single-level optimization problem. Since OSDT-based decision models have non-smooth and non-convex lower level programs, traditional reformulation methods are not applicable to them. In this dissertation, we propose new reformulation methods to these special bilevel programs by transforming them into general single-level optimization problems. We consider two models with one-dimensional lower level variables and multi-dimensional lower level variables, respectively. The reformulated models are more tractable than original bilevel optimization models so that they can be solved with the commonly used optimization methods or software.

Finally, we apply the OSDT-based decision approach to a single-item newsvendor problem and a multi-item production planning problem. We build OSDT-based newsvendor models for an innovative product and OSDT-based production planning models for multiple short life-cycle products, respectively. We apply the proposed reformulation methods to these specific models and give corresponding single-level equivalent models for them. In particular, for OSDT-based production planning models, we consider two types of constraints of the lower level problems, that is, cuboid constraints and ellipsoidal constraints. Preliminary numerical experiments and computational discussions are also given in this dissertation.

## 審査結果の要旨

以下は、横浜国立大学大学院国際社会科学府博士課程後期朱希徳氏が、2018年12月に横浜国立大学大学院国際社会科学研究院に提出した学位請求論文「Bilevel Programming Approaches to One-Shot Decision Problems and Their Applications」に関する審査要旨である。

### 1. 本論文の構成概要

本論文では、リスクや不確実性を含むワン・ショット意思決定問題を解決するため、ワン・ショット意思決定理論に基づき **bilevel programming problem** を提案し、提案したモデルを解くため、新しい解法を開発した。さらに、提案した **bilevel programming problem** を用いて、新聞売り子問題と多品目革新的製品の生産計画問題を分析している。本論文の構成概要は以下のようになる。第1章では、研究の背景、動機、目的を紹介したうえで、本研究の貢献を概観した。第2章では、ワン・ショット意思決定理論に基づき、**bilevel programming problem** を提案し、それに対応する最適化モデルを構築した。第3章では、構築した **bilevel programming problem** の最適解を求めるため、新しい解法を提案した。これにより、**bilevel programming problem** を通常の最適化問題に変換し、最適解を求めることができるようになった。第4章と第5章では、提案したアプローチに基づき、新聞売り子問題と多品目革新的製品の生産計画問題を分析した。第6章は本論文全体の結論となっている。

## 2. 本論文の評価

研究の貢献は主に以下の四点である。

1. リスクや不確実性を伴う多くの意思決定問題には、意思決定者は通常、意思決定を行うチャンスが一回しかない。このような問題はワン・ショット意思決定問題と呼ぶ。このような問題に対して、期待効用関数を用いて分析している論文が多数あるが、数多くの心理学実験と実証研究により、期待効用関数理論に基づいたモデルは必ずしも意思決定者の実際の行動を説明できないことがわかっている。特に、期待利得を最大化するモデルは繰り返される意思決定問題に適用するが、ワン・ショット決定問題に対して、このような方法は妥当ではない。本論文では確率計画問題において、ワン・ショット意思決定理論に基づき、**bilevel programming problem** を用いて、新たな定式化を提案した。提案した **bilevel programming problem** において、下位レベルの問題では実行可能解ごとに確率変数の各実現値にもたらされた利得に関する満足度とこの実現値の **likelihood** を考量し、意思決定者にとって一番目立った実現値をこの実行可能解の焦点として求め、上位レベルの問題では、下位レベルの問題で求められた各実行可能解の焦点に基づき、最適解を求める。確率計画問題には 2 段階確率計画問題 (**two-stage stochastic programming problem**) と確率制約条件問題 (**chance constrained problem**) があるが、提案したワン・ショット意思決定理論に基づく **bilevel programming problem** は今までにない斬新な定式化で、確率計画問題において理論的な貢献が大きい。
2. **bilevel programming problem** の最適解を求めるため、この問題を 1 段階の最適化問題に変換することが必要である。もし下位レベルの問題は凸計画問題でなおかつ一定の正規条件(例えば、スレーター条件)を満たせば、**bilevel programming problem** は相補性制約をもつ非線形計画問題になり、従来の最適化理論によって最適解を求めることができるが、提案した **bilevel programming problem** の下位レベルの問題はマキシミン問題なので非凸であり、なおかつ場合によっては微分不可能であるため、従来の **bilevel programming problem** の解法は適用できない。本研究では、提案した **bilevel programming problem** を 1 段階の最適化問題に変換する必要十分条件を提示し、新たな解法を提案した。従来解決できなかった最適化問題を解決することは、最適化理論において、重要な貢献である。
3. 提案した **bilevel programming problem** に基づき、新聞売り子問題を分析した。下位レベルの問題では、発注量ごとに各需要の発生する **likelihood** と、その需要が実現したときに得られる利得に対する満足度に基づき、すべて可能な需要から **likelihood** と満足度ともに高い需要(ポジティブ焦点需要)或いは **likelihood** が高く満足度が低い需要(ネガティブ焦点需要)を求める。上位レベルの問題では下位レベルの問題で求められたポジティブ焦点需要或いはネガティブ焦点需要に基づき、最適発注量を決める。ポジティブ焦点需要に基づき、最適発注量を決める小売業者は楽観的な小売業者と呼び、ネガティブ焦点需要に基づき、最適発注量を決める小売業者は悲観的な小売業者と呼ぶ。提案したモデルから(1)楽観的な小売業者の最適な発注量とその発注量のポジティブ焦点需要が一致する、(2)楽観的な小売業者は悲観的な小売業者より、多めに発注する、などの興味深い経営的洞察が得られた。
4. 提案した **bilevel programming problem** に基づき、不確実性下の多品目革新的製品の生産計画問題を分析した。多品目革新的製品の単位利益は正規分布に従っているとし、実行可能生産量の集合は直方体と楕円体と二つの状況を考えて数値実験を行った。その数値実験により提案した方法と従来用いられる方法と比較し、以下のような興味深い経営的洞察が得られた。
  - 1) マキシミンモデルを利用する製造業者、悲観的な製造業者、期待利益を最大化する製造業者、楽観的な製造業者およびマキシマックスモデルを利用する製造業者の順に、最適な生産計画を求めたとき考えた多品目革新的製品の単位利益は増えている。
  - 2) 考えられる単位利益の範囲を広げると、マキシミンモデルを利用する製造業者と悲観的な製造業者はより保守的な態度をとり、マキシマックスモデルを利用する製造業者と楽観的な製造業者は、より積極的な態度をとる。しかし、期待利益を最大化する製造業者に影響を及ばない。

3) 単位利益に関する不確実さが増すと、マキシミンモデルを利用する製造業者と悲観的な製造業者は最適生産量を減少し、マキシマックスモデルを利用する製造業者と楽観的な製造業者は生産量を増加し、期待利益を最大化する製造業者は生産量を変化させない。ちなみに、不確実さを増加することで、マキシミンモデルを利用する製造業者と悲観的な製造業者は一層警戒心を持つことになり、逆に、マキシマックスモデルを利用する製造業者と楽観的な製造業者にとって、不確実さの増加はチャンスと考えられる。

本研究で得られた研究成果は確率計画問題、最適化理論、経営科学において重要な貢献であると言える。朱希徳氏は今までに国際会議論文（査読付き）を二編と国際学術ジャーナルである「Mathematical Methods of Operations Research」に論文（査読付き）を一編発表した。以上より審査委員一同は本研究院の博士号審査基準(1)に照らして、朱希徳氏の学位請求論文「Bilevel Programming Approaches to One-Shot Decision Problems and Their Applications」が、博士（経営学）の学位を授与するものに相応しいものと判断する。

2019年1月22日

審査委員主査	横浜国立大学国際社会科学研究院教授	郭 沛俊
審査委員	横浜国立大学国際社会科学研究院教授	秋山 太郎
審査委員	横浜国立大学国際社会科学研究院教授	田名部 元成
審査委員	横浜国立大学国際社会科学研究院准教授	成島 康史
審査委員	横浜国立大学国際社会科学研究院准教授	無藤 望

参考：朱希徳氏の指導委員会の構成員は以下の通りである。

責任指導教員	横浜国立大学国際社会科学研究院教授	郭 沛俊
指導教員	横浜国立大学国際社会科学研究院教授	田名部 元成
指導教員	横浜国立大学国際社会科学研究院准教授	成島 康史

注 論文及び審査結果の要旨欄に不足が生じる場合には、同欄の様式に準じ裏面又は別紙によること。