

修士（工学）野村俊一郎提出の論文は「Multi-Stage Robust Decision Making: Decision Support Framework Under Deep Uncertainty and Its Application to Technology Roadmapping（多段階ロバスト意思決定：深い不確実性の下での意思決定支援フレームワークと技術ロードマッピングへの応用）」と題し、英語で書かれ、7章と付録からなっている。

宇宙開発においては、米国の有人宇宙飛行計画に見られるように、政局により計画が変わるなどの政治的な不確実性、システムの複雑さに由来する技術的不確実性、環境に関する知識不足に由来する科学的不確実性が存在し、後になって予想をはるかに超える経費や計画の長期化につながるが多々みられる。これは宇宙開発に限らず、今後、二酸化炭素の排出量を技術開発によって削減していく必要のある海事業界など、他の業界においても存在する危険性である。そのような状況下では、事前に確率モデル化できない「深い不確実性」に強いロバストな意思決定、さらには状況の変化や明確化に応じて意思決定を段階的に詳細化する多段階の意思決定を行うことが要求され、人間には対応できない複雑度の問題においては、人間の意思決定をサポートする意思決定支援ツールが必要である。

そこで本論文では、このような意思決定に際し要求される機能を整理し、ロバスト意思決定のフレームワークをベースにした非確率的な不確実性モデルによって不確実性を定式化するとともに、多段階意思決定機能（MSRDM: Multi-Stage Robust Decision Making）を備えたマルコフ決定過程（MDP: Markov Decision Process）である MSRDM-MDP を導入し、これらを組み合わせ、強化学習等のコンピュータ解析によって支援される意思決定の統合的プロセスを提案している。この手法は、考慮する不確実性の程度に応じた最悪・最良最適な方策が意思決定者に提示され、さらにコンピュータによる詳細な不確実性解析やセンシティブティアナリシスを通して、意思決定者が不確実性に対しての大局的な感度を把握・理解しながら最終的な採用方策を決定することが可能となるフレームワークであることが、実例への適用を伴って示されている。

第1章では、序論として、宇宙開発や海事業界においては深い不確実性の下での意思決定が頻繁に求められることを具体例で紹介し、そのような状況においては不確実性を考慮に入れ、性能とロバスト性のどちらにも長けた戦略を選択するべきであり、さらに状況をコストをかけても見極めた上での多段階の意思決定が時に有用であると述べ、本研究のベースとなる課題をまとめている。

第2章では、提案する手法のもととなるリスク測度という概念を提案し、確率的な多段階意思決定手法であるマルコフ決定過程とその最適方策の求め方としての強化学習手法を説明している。最後に、意思決定プロセスにおける提案フレームワークの範囲を整理し、これまでの研究成果と本研究の差異を明確化している。

第3章では、非確率的な不確実性の下での多段階意思決定のモデルとして、MSRDM-MDP を提案している。これはマルコフ決定過程(MDP)を拡張したものであり、MDP にはないシナリオと信念という概念を新たに導入している。さらに、定式化された MSRDM-MDP における最良または最悪割引累積報酬を最大化する最適化問題が、サンプリ

ングによる近似を伴ったベルマン方程式に帰着され、その結果、強化学習のアルゴリズムによって最適方策が求められることを示している。

第 4 章では、不確実性の下で性能とロバスト性のトレードオフを検討するための手法として HoU (Horizon of Uncertainty) 解析を提案している。HoU 解析により、不確実性領域の大きさと最良・最悪性能との関係をプロットすることが可能となり、意思決定者がロバスト性と性能のバランスを考えながら戦略を選択できるフレームワークを提供することができる」と述べている。

第 5 章では、提案した MSRDM フレームワークを、宇宙機フォーメーションフライングの技術ロードマップ問題に適用している。科学ミッションに応じて要求されるレベルの異なるフォーメーションフライング技術を、段階的に開発する 3 つの戦略および、すべてを一気に開発する積極的開発戦略など複数の戦略を MSRDM-MDP によってモデル化し、HoU 解析によりそれぞれの戦略の利点と弱点を明らかにしている。さらにその結果をこの分野の専門家に示し、本手法により不確実性を定量的に認識できるという価値があると評価されている。

第 6 章では、同手法を船舶推進系技術の温室効果ガス削減のための技術ロードマップ問題に適用している。国際海事機関によって設定された温室効果ガス削減目標を達成するために必要な推進系はいくつかの選択肢が存在し、それぞれに開発期間・コスト・温室効果ガス削減性能の不確実性や、将来的にどのような燃料供給インフラが普及するかという外的要因からくる不確実性が存在する。本研究では MSRDM-MDP によってそれらをモデル化し、HoU 解析を行うことで、ロバスト性と性能を含む各開発戦略の利点と弱点を明らかにしている。さらに、強化学習によって最悪最適方策を導出することで、人間の提案するいずれの候補方策よりも優れた最悪割引累積報酬を得る方策を求められることを示している。

第 7 章は、本論文の結論と今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文では、宇宙開発等における技術ロードマップ構築をはじめとする深い不確実性の下における意思決定問題において、性能とロバスト性のトレードオフを検討するための解析手法と段階的な意思決定のフレームワークを提案し、それを宇宙・船舶分野の二つの実問題に適用してその効果を実践的に示したものであり、宇宙工学・システム工学上貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。