

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 永田 基樹

系の大きな変化を事前に予測し検出することは、非常に重要である。例えば、電力系統には太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが今後さらに導入されるようになることが予想されるが、再生可能エネルギーは出力変動が大きいため、電力系統を不安定化する傾向があり、さらに停電をまねく可能性もある。停電の予兆を検出することができれば、停電を防ぐ適切な処置を取ることができるため、停電の予兆を発見することは重要である。また、金融システムにおいては、大暴落は国際経済に大きな影響を与えるため、それを事前に予知して食い止めることは重要である。電力システムや金融システムは高次元のシステムであり、変動の原因は多種多様で、そのメカニズムは十分に明らかにされていない。本論文は、電力システムや金融システムにおいて、時系列データから大きな変動の検出を行うための数理的手法の開発を目的としている。

本論文は「Theoretical Analysis on Detection of Systemic Catastrophes in Complex Social Systems」(複雑社会システムにおけるシステム破綻の検出に関する理論解析)と題し、8章からなる。

第1章「Introduction」(序論)では、再生可能エネルギーの今後の導入の展望と、電力系統における安定性解析の概要を解説し、本研究の位置付けを示した。また、予兆検出や変化点検出に関する既存の数理的手法や、数理ファイナンスの発展について説明し、新たな数理的手法の開発が重要であることを強調した。

第2章「Mathematical Models of Power Grids」(電力系統の数理モデル)では、電力系統に関する2つのモデルを説明した。1つ目のモデルは、位相のみを変数に持つ微分方程式モデルで、2つ目のモデルは、電圧変動や無効電力値を考慮に入れた、位相と電圧を変数に持つ代数微分方程式モデルである。また、この2つのモデルの関係性について説明した。

第3章「The Impact of Smoothing Effect on Power Grid Robustness」(電力系統のロバスト性に対するならし効果の影響)では、電力系統の様々な性質の中で、特にならし効果と呼ばれるものが重要であることを説明した。ならし効果は、再生可能エネルギーの合計量の変動が個々の変動の合計量より小さくなる現象であり、ノード間の相関が小さいことに起因するものである。本研究では、ならし効果が系統全体にどのように影響を与えるかを解析した。本研究により、ならし効果が系統全体のロバスト性を高めることが明らかになった。

第4章「The Comparison of Methods to Quantify the Robustness」(ロバスト性を定量化する手法の比較)では、ノードのロバスト性を定量化する手法が2つあることを説明した。1つ目は電力の変動に対するロバスト性を定量化する手法であり、2つ目は位相の変動に対するロバスト性を定量化する手法である。先行研究では、この2つの手法のいずれかしか用いられておらず、手法間の関係が明らかでなかった。同じネットワーク構造の電力系統で比較を行うことで、両者の手法が大きく異なるロバスト性の定量化を

行っていることが明らかになった。

第5章「Network Motif and Robustness in Power Grids」(電力系統におけるネットワークモチーフとロバスト性)では、先行研究においてロバスト性をノードごとにしか求めておらず、ノード間の接続関係を考慮していないことの問題点を明らかにすることを目的とした。ネットワーク科学において、複雑ネットワークにおけるノードの接続関係に関する様々な性質が研究されているが、中でもネットワークモチーフは非常に重要である。本研究では、ネットワークモチーフが電力系統のロバスト性とどのように関係しているかを数値的に示した。

第6章「Detecting Early Warning Signals for Blackouts in Power Grids」(電力系統における停電の予兆検出)では、電力系統において、停電の予兆検出を行うことを目的とした。動的ネットワークマーカーと呼ばれる手法とクープマンモード分解と呼ばれる手法を適用し、性能を評価した。また、クープマンモード分解に関する数理的な問題点を明らかにし、手法の拡張を行った。さらに、変化の直後に変化が起こったことを検出することも社会的意義が高いため、予兆を検出するだけではなく変化の直後に変化の検出を行えるかどうかを検証した。

第7章「Detecting Change Points in Financial Systems」(金融システムにおける変化点検出)では、第6章で取り上げた各手法を金融システムに適用し、変化点の検出が行えるかを数値的に示した。特に、動的ネットワークマーカーにおいては、ドミナントグループの推定が必要であり、ドミナントグループを推定する手法を2つ提案した。本研究により、金融システムにおいても一定の範囲内で変化点の検出が行えることを明らかになった。

最後に第8章「Conclusion」(結論)では、本論文の成果を簡潔に纏めると共に、今後の研究課題を提示している。

以上を要するに、本論文は電力システムにおいて、系統のノード間の相関関係や接続関係を考慮して系統のロバスト性を解析し、系の安定性を維持するための知見を明らかにした。また、電力システムや金融システムにおいて、停電などの変化点を検出する手法を明らかにした。これは数理情報学分野の複雑社会システムへの応用に寄与した。

よって本論文は博士(情報理工学)の学位請求論文として合格と認められる。