

氏名（本籍） 藤田実沙（埼玉県）  
学位の種類 博士（工学）  
学位記番号 甲第1044号  
学位授与の日付 2020年3月17日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
学位論文題目 **An Approach to Steiner Tree Problem in  
Graphs by Network Centralities and Chaotic  
Neurodynamics**  
(ネットワーク中心性とカオスニューロダイ  
ナミクスを用いたグラフ的シュタイナー木問  
題の解法)

論文審査委員 (主査) 教授 池口 徹  
教授 渡邊 均 教授 八嶋 弘幸  
教授 赤倉 貴子 教授 谷口 行信  
准教授 池辺 淑子 教授 長谷川幹雄

## 論文内容の要旨

本論文の目的は、グラフ的シュタイナー木問題に対する効率的な近似解法を開発することである。グラフ的シュタイナー木問題は、頂点と辺からなる無向グラフと、辺の重み関数、頂点の部分集合からなる必須点集合が与えられたとき、全ての必須点を連結する木のうち、木に含まれる辺の重みの和が最小なものを求める組合せ最適化問題である。グラフ的シュタイナー木問題は回路の自動設計や、省エネルギーな通信網・電力網の設計などへの応用が期待されている重要な問題である。しかし、グラフ的シュタイナー木問題は NP 困難な組合せ最適化問題であるため、より早くより良い解を求める近似解法が開発が望まれている。

組合せ最適化問題に対する近似解法には、早さを重視した構築法と解の良さを重視した改善法という 2 種類のアプローチがある。そこで本論文では、グラフ的シュタイナー木問題を解くための効率的な構築法と改善法を提案している。具体的には、複雑ネットワーク理論で用いられているネットワーク中心性を導入した構築法と、解探索にカオスダイナミクスを導入した改善法である。

グラフ的シュタイナー木問題に対する構築法では、最短経路や最小全域木を用いて解を構築することが一般的である。しかし従来の構築法は、最短経路同士の重なりを考慮していないため、良い解が得られることもあれば悪い解が得られることもあるという問題点がある。そこで本論文では、複雑ネットワーク理論で近年注目を集めているネットワーク中心性を用いることにより、最短経路同士の重なりを考慮して解を構築することを提案した。ベンチマーク問題を用いた数値実験の結果、提案法は従来法よりも計算時間が伸びるものの、最適解からの誤差率を3%程度改善することができた。

グラフ的シュタイナー木問題に対する改善法では、巡回セールスマン問題などのNP困難な組合せ最適化問題に対して効率的な解探索を実現できる、カオスサーチをグラフ的シュタイナー木問題に適用する方法を提案した。これまでにカオスニューラルネットワークが適用されてきた組合せ最適化問題はどれも、局所探索法が実行可能解のみを生成する問題であった。しかし、グラフ的シュタイナー木問題に対する局所探索法には、実行可能解だけでなく実行不可能解も生成するものがある。これにより、実行不可能解に対応したニューロンをどのように処理するかという問題が生じる。本論文では、実行不可能解に対応したニューロンを一次的にニューラルネットワークから外すことでこの問題点を解決した。数値実験の結果、提案法はパラメータを適切に設定することにより、タブーサーチよりも誤差率の低い解を発見することができた。

以上まとめるに本論文では、(1) ネットワーク中心性を用いた効率的な構築法を提案し、さらに (2) カオスダイナミクスを用いた効率的な改善法を提案した。ベンチマーク問題を解くことにより、これら提案法が従来法よりも誤差率の低い解を得られることを明らかにした。

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、学長からの審査の付託を受けて、標記7名の審査委員で構成する審査委員会を組織し、提出された学位論文について審査を行った。審査委員会では、学位申請者より学位論文の内容、あるいは前回審査における指摘事項に対する対応結果について説明し、その後、質疑応答を実施することで、博士論文として満たすべき条件や必要な修正点を確認する、という形式で進めた。

本論文は、「An Approach to Steiner Tree Problem in Graphs by Network Centrality and Chaotic Neurodynamics (ネットワーク中心性とカオスニューロダイナミクスを用いたグラフ的シュタイナー木問題の解法)」と題し、全5章より構成されている。

本論文の目的は、グラフ的シュタイナー木問題に対する効率的な近似解法を開発することである。グラフ的シュタイナー木問題とは、頂点と辺からなる無向グラフと、辺の重み関数、頂点の部分集合からなる必須点集合が与えられたとき、全ての必須点を連結する木のうち、木に含まれる辺の重みの和が最小なものを求める組合せ最適化問題であ

る。グラフ的シュタイナー木問題は回路の自動設計，通信網・電力網の設計などへの応用が期待されている。

組合せ最適化問題に対する近似解法は，速さを重視した構築法と解の良さを重視した改善法という 2 種類のアプローチがある。本論文では，グラフ的シュタイナー木問題を解くための効率的な構築法と改善法を提案している。具体的には，複雑ネットワーク理論で用いられているネットワーク中心性を導入した構築法と，解探索にカオスニューロダイナミクスを導入した改善法である。その際，提案手法と従来手法の性能比較をするだけでなく，どのような問題に対して提案手法が有効となるのかという観点からの解析も行っている。

第 1 章では，導入として，組合せ最適化に関する研究背景，また，これに関連して，グラフ理論，計算複雑性，組合せ最適化とネットワーク中心性・カオスニューロダイナミクスの関係について述べ，本研究の意義と重要性について述べている。

第 2 章では，本論文が対象とするシュタイナー木問題について述べている。また，本論文で対象とするグラフ的シュタイナー木問題の工学的応用について記述している。さらに，本論文での数値計算で用いたグラフ的シュタイナー木問題のベンチマーク問題についても述べている。

第 3 章では，グラフ的シュタイナー木問題に対するネットワーク中心性をを用いた新しい構築法を提案している。グラフ的シュタイナー木問題に対する構築法では，必須点間の最短経路を用いて解を構築することが一般的である。しかし従来の構築法は，最短経路同士の重なりを考慮していないため必ずしも良い性能の解が得られるとは限らない。そこで本論文では，複雑ネットワーク理論で近年注目を集めているネットワーク中心性をを用いることによりグラフ上で中心となる (=重要となる)頂点を同定し，必須点間の最短経路同士の重なるようにする手法を提案している。ベンチマーク問題を用いた数値実験の結果，提案法は従来法よりも計算時間が伸びるものの，解性能を改善できることを示している。また，提案手法は特に必須点割合が 25%程度の問題に対して有効となることも明らかにしている。

第 4 章では，グラフ的シュタイナー木問題に対する改善法として，これまでも種々の NP 困難な組合せ最適化問題に対して有効となることが示されているカオスニューロダイナミクスを用いた手法を提案している。ベンチマーク問題を用いた数値実験の結果，遺伝的アルゴリズム，GRASP などの従来解法よりも優れた性能を示すことを明らかにした。また，タブーサーチとの比較では，提案法がその探索過程において目的関数値が小さい解を頻繁に探索できていること，従って，提案手法の解探索性能の信頼性が十分に高いことなどが示されている。

第 5 章では本論文で得られた結果をまとめ，今後の課題について述べている。

以上まとめるに，本論文では，グラフ的シュタイナー木問題に対する，ネットワーク中心性をを用いた効率的な構築法とカオスニューロダイナミクスを用いた効率的な改善法を提案している。また，グラフ的シュタイナー木問題のベンチマーク問題を用いた数値

実験により，提案した手法が従来手法と比べて，効率的であり良好な性能を示すことを明らかにしている．

以上により，本論文審査委員会では，本論文が博士（工学）として十分に価値あるものと認める．