HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	自己組織化臨界ダイナミクスによるフラクタル・ネットワークの構造形成［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	渡邉, 章友
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12298号
Issue Date	2016-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61632
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Akitomo_Watanabe_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　渡邉 章友

審査担当者　主　査　教　授　矢久保 考介
副　査　教　授　折原 宏
副　査　教　授　根本 幸児 (理学研究院)

学位論文題名

自己組織化臨界ダイナミクスによるフラクタル・ネットワークの構造形成
(Formation mechanism of fractal complex networks by self-organized critical dynamics)

離散的な要素間の関係性は、ネットワークという概念を用いて記述することができる。構成要素 (ノード) とそれらの間の対関係 (エッジ) さえ定義できれば、どのような系でもネットワークとして表すことができるため、我々の身の周りに遍在する多様な複雑系を複雑ネットワークとして記述し、それらの構造やそこで起こる様々な現象を統一的に理解し、工学的に応用しようという研究が近年盛んに行われている。ネットワーク科学と呼ばれるそのような学問分野におけるこれまでの研究によると、現実の複雑ネットワークの構造は、平均ノード間距離 (ノード対間の最短経路内エッジ数の平均値) がノード数の対数程度に比例するスモールワールド構造と、ノード数のベキ乗に比例するフラクタル構造に大別できることが知られている。スモールワールド構造の起源は既に明らかにされているが、フラクタル構造の発現メカニズムについては未だ解明されていない。また、幾つかの現実ネットワークで観測されているスモールワールド構造とフラクタル構造の間のクロスオーバーについても、その発現機構は未解明のまま残されている。スモールワールド構造とフラクタル構造とでは、ネットワーク上の反応、拡散、浸透、移流、同期などの様々なダイナミクスの性質が質的に変わるため、どのような条件下でフラクタル構造 (或いはスモールワールド構造) が現れるかを解明することは、複雑系の統一的理解のみならず、工学的にも極めて重要な課題である。

本研究で申請者は、海岸線や河川の分岐構造などの実空間に埋め込まれたフラクタル構造が自己組織化臨界性 (SOC) を示すダイナミクスによって形成されることに着目し、複雑ネットワークにおけるフラクタル性も何らかの SOC ダイナミクスによって発現しているものと考えた。このアイデアを具体化するため、申請者は新規ノードの参入によるネットワークの成長と、大きく成長したネットワークにおける過負荷故障のカスケード過程からなるネットワーク構造の時間発展モデルを提案した。インターネットや電力網などの機能性ネットワークにおいては、一般に時間的に揺らぐ負荷がノードの耐性を超えると故障が起こり、この故障が負荷の迂回を引き起こすことで更なる過負荷故障を誘発する。申請者は、このようなネットワーク上の過負荷故障カスケードを、負荷の動的振舞いをランダムウォーカーと見なすことによってモデル化している。

ネットワーク構造の時間発展を数値的に追跡した結果、以下のことが明らかとなった。(1) ネットワークが無限に成長することはなく、ある閾値に達すると過負荷故障カスケードにより不安定化し、大域的な崩壊を引き起こす。その後再び成長し始めるため、成長と崩壊を繰り返すアトラクターに吸引される。(2) このようなネットワーク構造のダイナミクスは自己組織化臨界性を示す。(3) 大域的な崩壊を起こした直後のネットワーク構造はフラクタル性を有する。(4) 大域的崩壊の

直前のネットワークはスモールワールド構造を取る。(5) フラクタル・ネットワークからスモールワールド・ネットワークへの構造クロスオーバーは、成長に伴うショートカット・エッジの形成によるものである。

本論文は全 8 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。第 1 章は序論であり、本論文の主題である SOC ダイナミクスに基づくフラクタル・ネットワークの構造形成に関する研究の背景が概説されている。第 2 章では、従来研究によって明らかにされている複雑ネットワークの構造的性質を詳しく説明している。第 3 章では、スモールワールド性とフラクタル性について詳しく述べられ、これらの性質を有するネットワークを形成する数理モデルと両構造のクロスオーバーについて説明されている。第 4 章では、自己組織化臨界性という概念の一般論について説明した上で、ネットワーク構造に対する SOC モデルが未だ提案されていないことを述べている。また本章の最後に、これまでの研究を踏まえた上で本論文の目的が改めて示されている。第 5 章では、様々な構造不均一性を有する複雑ネットワーク上での触媒反応ダイナミクスの SOC モデルを詳細に調べ、SOC の普遍クラスが構造的不均一性に依存しないという本研究の一つの成果が示されている。第 6 章では、成長を伴わない大規模な初期ネットワークからの過負荷故障カスケードに関する従来研究が説明されている。第 7 章では、成長と過負荷故障カスケードに基づいたネットワーク構造の時間発展モデルが提案され、このモデルによる構造形成ダイナミクスが SOC を示すことを数値的に検証している。また、上述の結論 (1)-(5) のすべてが詳しく述べられるとともに、SOC が発現するために必要なモデルパラメータに対する条件が考察されている。第 8 章は結論であり、複雑ネットワークにおけるフラクタル性の発現機構、フラクタル性と臨界性との関係、フラクタル構造からスモールワールド構造へのクロスオーバー・メカニズムに関して本研究から得られた知見がまとめられている。また、本研究を起点とした今後の研究の方向性についても触れられている。

これを要するに著者は、我々の身の周りに遍在する複雑ネットワークが共通した構造的特徴を示す理由を自己組織化臨界ダイナミクスの中に見出すことで、複雑系に対する新知見を与えただけでなく、ネットワークの新奇機能の創出やデザインに対して重要な情報を提供したものであり、応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。