

(89) 都市防災領域におけるフラクタル解析の適用について

攻玉社工科短期大学 正員 大野 春雄

1. はじめに

ライフラインの防災性の既往研究の課題は、システムの耐震性、信頼性の検討を始めとして、二次的被害の防止、復旧予測・機能評価や最適な復旧計画の検討等が挙げられる。この中でも震後の復旧予測や機能評価は、被害軽減対策や復旧対策等のライフライン防災計画の立案において中心的な位置を占めていた。ライフラインを取り上げてみると、電力・上水道・交通・ガス等の各々のシステムの耐震性に関する領域研究はある程度問題解決されてきているといえる。しかし、ライフライン機能ひいては都市機能の総合的な計画指針を得るには、各々のシステムを個別にアプローチしてきたため未解決となっている。また、安全な都市を築くための都市防災という領域からライフライン研究の成果を見ると、都市機能の総合的な計画指針を得る段階には至っていない。

これらのライフライン地震防災をはじめとする都市防災領域に関する研究は、総合化問題について解明して行かなければならない段階にきているといえる。ライフラインは都市全体として重要な機能を有するものであることから、ライフラインの全体機能の耐震性を評価する研究の必要性があるといえる。

そこで、本研究は都市機能としての都市全体のライフライン機能に着目し、研究の背景となる既往研究での重点項目を確認し、ライフライン全体（電力・上水道・都市ガス・道路等）を一つの巨大システムとしてとらえ、都市と都市施設との側面からみて、その総合的な充足性やバランスの判断等から、総合指標ひいては耐震性の総合評価法の可能性についてフラクタル解析の適用に着目し考察する。

2. ライフライン研究の重点項目

ここでは、著者が行ったライフライン地震防災に関する研究³⁾の流れ（図-1）を例に取り、ライフライン全体の総合評価に向けて、重要と考えられる研究項目を挙げてみる。

(a) ライフラインネットワークのモデル化

システムをネットワークモデルで表現し、ネットワーク解析等によりシステムの信頼性を評価している。モデル化がその結果に大きく影響する。現実システムをモデル化する場合、目的に応じてシステムの表現レベル（例えば幹線網）を検討しなければならない。また、ネットワークの階層構造も考慮しなければならない。

(b) 物理的被害と機能被害の関係

構造物の被害とシステムの供給機能の関係はネットワーク構造物であるため、複雑な計算過程を必要とする。ネットワークが大規模になればなるほど、計算時間を必要とする。この関係については簡略化の研究も進められている。

(c) ライフラインの相互影響

電力、上水道、都市ガス等の供給機能をもったシステムに着目してみると、そのシステム間には相互影響が存在する。例えば、停電による浄水場やポンプ所等のポンプ機能の停止、断水による火力発電所の冷却水の

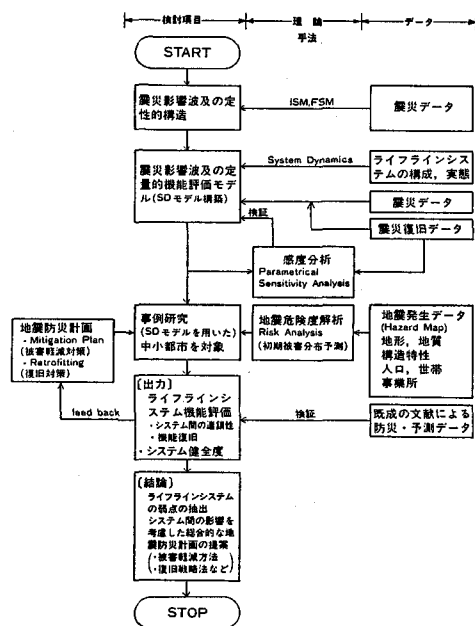


図-1 ライフライン研究フローのサンプル

不足、またガスの供給停止による電力需要の増大等が挙げられる。当然ながら、震後の復旧過程にもこの影響は存在する。この結果、複合的な機能マヒが生じる。

(d)地震危険度解析の一元化

各ライフラインの事業主体によって異なる地震危険度解析の統一性の問題が挙げられる。少なくとも同一都市域内の各システムに用いる解析規準を一元化する必要がある。

(e)予測モデルの頑強性¹⁾

予測モデルの検証は、過去の被害事例をもとに行うのが一般的であるが、地震による被害事例は非常に少ない。このような状況でモデルの頑強性(robustness)を示すならば、モデルのフレームや用いた仮定の論理性の確認が重要となる。また不確実な問題は整理し、その認識が必要である。

(f)計画領域に踏み込んだ研究

研究成果が事業主体の専門家らに有効な計画指標を与えられ、現実場面へのフィードバックが可能となっているか問題がある。計画目標に対してシステムを制御できるような領域が必要である。“予測する”から“制御できる”という分野を追求しなければならない。

(g)都市政策科学的アプローチ

ライフラインは都市の中核機能となっている。都市の安全性、快適性のコントロールファクターとなるのがライフラインであるといっても過言ではない。都市全体に着目して、都市のスプロールとライフライン機能のバランス等も議論する必要があるのではないか。

以上の(a)～(g)の研究項目から、都市機能としてのライフライン全体を対象とする研究の場合、従来の手法を積み上げてアプローチするには、システムが巨大かつ複雑になりすぎると考えられる。

前述の(a)、(b)および(c)の項目はライフラインの供給機能の評価を中心とした領域であり、(f)および(g)はライフライン施設の確保するための計画目標領域に関するものといえる。敢えて分類するならば、前者はミクロ領域、後者はマクロ領域となる。

ライフラインである電力・上水道等の供給網や道路網等のネットワーク状の構造物を平面的にとらえ、その構成の形状・形態に着目する。地域に対して密に配置されていれば、一般的に無理のない信頼性の高いシステムと云っても良いかも知れない。このことから、ライフラインネットワークの供給対象地域に対する充足性をとらえるために、ここでは幾何学的特性を考慮するフラクタル次元⁴⁾の利用が挙げられる。すべてのライフラインネットワーク(全システム、全階層)を対象地域にオーバーレイさせた図形のフラクタル次元により、全体のライフラインの供給信頼性に関する総合指標が得られると考える。都市防災的なライフラインの安全指標を得ることが目指せるのではないだろうか。

3. フラクタル

本研究では、ライフラインネットワーク形状のフラクタル性に着目し考察を進めるため、ここではフラクタルについてその概要を示す。B. B. Mandelbrot (IBMワトソン研究所)⁴⁾により提唱されたフラクタルとは、特徴的な長さをもたないような図形や構造の総称で、微分が定義できない形としている。フラクタル性を定量化するものにフラクタル次元があり、整数値のみを対象とした日常的なユークリッド次元を拡張したもので、非整数値をもとり得る。この次元は図形の複雑さを定量化するものと考えられ、次元の高い方がより複雑である。

フラクタル次元の算定方法には、(1)祖視化の度合いを変える方法、(2)測度の関係より求める方法、(3)相関関数より求める方法、(4)分布関数より求める方法、(5)スペクトルより求める方法等がある。ここでは、(1)の祖視化の度合いを変える方法(ボックス・カウンティング法)に着目し、フラクタル次元算定の手順について、その基本的な方法について示す。

祖視化の度合いを変える方法による次元算定の手順

- (1)図形の読み込み：イメージスキャナーにより図形をコンピュータにイメージデータとして読み込む。
- (2)図形を座標データに展開：図形を直線に分割し、その始点、終点データを得る（ベクトルデータ化）。
- (3) $N(r)$ の算出：メッシュ間隔 r のとき線分がメッシュ内を通過するメッシュの個数 N をカウントする。
- (4) $\log r - \log N(r)$ の平面上に点プロット：点プロットし点列を作成する。
- (5)次元の決定：点列の回帰直線の傾きの絶対値をフラクタル次元とする。

現在、この方法によるフラクタル次元算定の自動化システムの構築をしているところである。

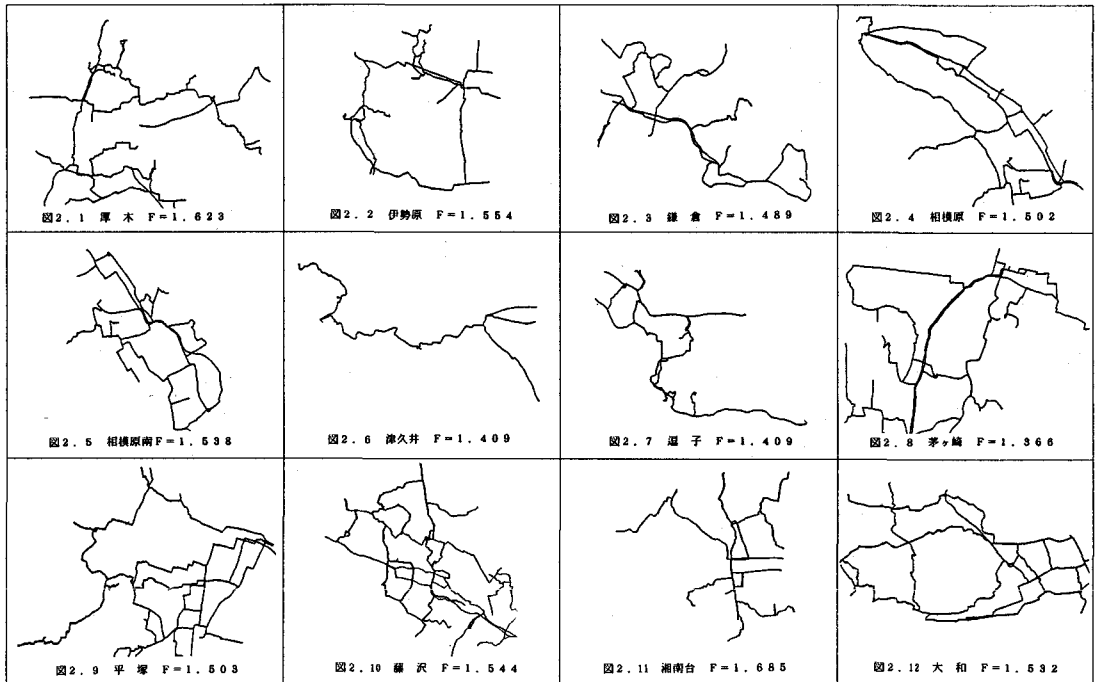
4. フラクタル解析の適用例：ネットワークのフラクタル次元

ここでは、ライフラインネットワークのフラクタル次元の基礎的適用例⁵⁾について示す。ライフラインの供給ネットワークは電力、ガス、上水道などのシステムの違いや大都市、中都市、小都市などの供給地域の違いにより、いろいろなネットワークを形成している。たとえば、上水道システムの管網に着目してみると、地域の都市化の度合いに応じて放射状からループ状へと変化させ冗長度を増し、その密度も高くなり複雑になっている。このようなネットワークに対する適用事例としては、中川らの研究⁶⁾が挙げられる。これはガス供給システムにおける低圧管レベルのネットワークのフラクタル性に着目し、地震被害時のネットワーク形状の変化とフラクタル次元との関係を示し、被害評価にこのフラクタル次元を用いている。

ここでは、ネットワークのフラクタル次元のもつ意味について検討するために、神奈川県企業庁水道局管内の12都市の管径 $\phi 400\text{mm}$ 以上の上水道システムのネットワークを対象として、これらのフラクタル次元が従来からのネットワークの構造計測値とどのような関係であるか、ネットワークの特性値として用いることができるかについて基礎的検討をする。

3)節で示した方法により、神奈川県企業庁水道局管内の12都市の上水道ネットワークのフラクタル次元を求めた。図2.1～図2.12にネットワークモデルと算出したフラクタル次元 F を示す。

このフラクタル次元と一般的なネットワーク計測値との関係について把握するために次に示す分析を行った。ライフラインネットワークの一般的な計測値として、ノード数、リンク長、閉路数、管路総延長などが



あるが、ここでは上水道の機能的側面を考え、給水量、給水戸数、供給面積、給水人口も含めて、これらのデータとフラクタル次元との関係を求めることにする。解析方法は、偏相関係数による相関分析およびクラスター分析による方法を用い、ネットワークのフラクタル次元と相関の高いネットワークの構造計測値を抽出する。これにより上水道ネットワークにおけるフラクタル次元の基本的特性について検討してみた。

偏相関係数による分析結果では、フラクタル次元と相関の高い要因として、管路の総延長、ノード数、リンク数、閉路数の順で挙げられる。また、階層的クラスター分析による結果では、デンドログラムの各断面で切断してできるクラスターにより対象を大分類、中分類、小分類等に分類でき、小分類で見るとノード数とリンク数のクラスター、給水量、給水戸数および給水人口のクラスターが形成され、閉路数、総延長、供給面積、フラクタル次元の要因はそれぞれ独立のクラスターとなっている。大分類になるにしたがい、フラクタル次元のクラスターとその他の8要因をまとめたクラスターに分類される。この結果から判断すると、フラクタル次元はネットワークの構造計測値である8要因の総合した傾向と類似性をもつことがいえる。

この結果は、2)節で述べたライフラインの全体システムの総合指標を得るための可能性を示唆したといえる。

5. おわりに

本研究における基礎的解析から、フラクタル次元はネットワークの一般的な計測値の性質をまとめた総合的な指標としての意味合いが強いことがいえる。ライフライン全体のネットワークの特性をとらえ、都市と都市施設の領域でその総合的なライフラインの充足性・安全性を示す値としてフラクタル次元を用いることの可能性を今回確認した。今後詳細な解析を続けて行きたい。

以上はマクロ領域の検討であるが、ミクロ領域の検討も同時平行的に進めて行かなくてはならない。ミクロ領域は従来からのネットワーク解析的なアプローチであるが、ライフライン全体を解析する場合、その規模が大きすぎる。個々のライフラインネットワークおよび全体の構成に着目してみると、階層構造をしたシステムの特性とシステム間の相互性が現れてくる。このような複雑で大規模なネットワークに対する供給信頼性を解析するには、ニューラル・ネットワーク⁷⁾の適用が最適ではないだろうか。

【参考文献】

- 1) 星谷勝：ライフラインの地震災害と復旧過程の予測モデルについて、平成2年度文部省科研費重点領域研究(1)、1991.3
- 2) 片山恒雄：都市防災とライフライン、都市計画、NO.168、日本都市計画学会、1991.3
- 3) 大野春雄：ライフラインの地震災害の相互影響と機能評価に関する研究、武蔵工業大学学位論文、1988.3
- 4) B.B. Mandelbrot: The Fractal Geometry of Nature, W. H. Freeman and Company, 1982, 広中平祐監訳、フラクタル幾何学、日経サイエンス社、1984
- 5) 大野春雄・中川昌美：ライフラインネットワークの特性値としてのフラクタル次元、土木学会第45回年次大会、1990.9
- 6) 中川昌美・佐武正雄・猪股亮裕：ライフラインシステムの震害評価におけるフラクタル次元の応用、土木学会論文集No.428/I-15、1991.4
- 7) 特集ニューラルネットワーク、人工知能学会誌、Vol.4, No.2、1989.3