

# 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

中川昌美\*・佐武正雄\*\*・猪股亮裕\*\*\*

複雑なネットワークを形成するライフラインシステムに発生する震害の程度を評価する簡便な方法として、フラクタル次元の変化に基づいた評価法を開発した。例として、宮城県沖地震の際、仙台市のガス末端供給網に発生した被害を用いて解析した結果、ガスライフラインシステムの供給率の低下とフラクタル次元の減少には強い相関関係のあることがわかった。

Keywords: Lifeline Network Systems, Damage Evaluation, Fractals

## 1. はじめに

1971年のサンフェルナンド地震や1978年の宮城県沖地震などにより、ライフラインシステムの震害が注目されている。ライフラインシステム末端部（例えば、ガス低圧管レベルの供給部であるブロックあるいはセクター）での被害は、通常多数発生し、システムのネットワーク形態の相違なども考慮すると、それらの物理的被害による機能障害を評価することは容易ではない。一方、ライフラインの末端部についての正確な復旧対策を立て、これを遂行していくためには、複雑で時間的に変化していくネットワークの被害を正しく評価し、それを復旧対策に取り入れていくことが要求される。

このように、ライフラインの幹線部のみならず末端部においても適切な被害評価は重要と考えられる。本研究では復旧に最も時間を要する供給領域の末端部で発生した「被害」を、システムの連結性だけでなくネットワーク形状の特性を考慮して正しく評価できる方法を提案し、実際のガスネットワークシステムに応用してその評価方法の妥当性を検討する。

## 2. フラクタルとフラクタル次元

末端部までを含んだライフラインシステムは非常に複雑なネットワークを構成しており、その様子は、河川・樹木あるいは血管などの供給システムが示す形状のそれに似ている。そこで、本研究では、まず、ネットワーク形状の複雑さを定量化し、分類することを試みる。

### (1) フラクタルについて

フラクタルはマンデルブロー<sup>1)</sup>により導入された概念

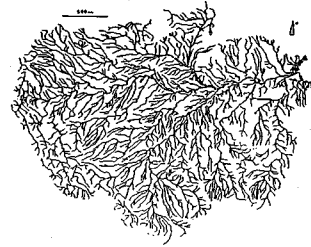


Fig.1 River network (Takayasu, 1987).



Fig.2 Electric powerline network (Minami Koizumi).

であり、一般に特徴的な長さや大きさ、測度をもたない図形・構造および現象の総称であると定義されている。

例えば、Fig.1に示す河川の形などは、特徴的な長さを持たない典型的なフラクタル図形であり、統計的な意味での自己相似性があり、どの部分も全体と同様な複雑さを持つ。Fig.2は仙台市南小泉地区の宮城県沖地震当時の配電網であるが、これを見ると、骨格をなすループ構造に加え、細部に供給するツリー構造が複雑に絡み合い統計的な意味での自己相似性を形成しているようである。Fig.3は、同じく仙台市郊外の南光台団地のガス低圧管網であり、ネットワークとしてのツリー構造はなく、全体がループ構造により形成されている。ガス配管網は道路網に支配され、このネットワークは造成団地の道路

\* 正会員 Ph. D 東北大学助手 工学部土木工学科  
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

\*\* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 学生会員 東北大学工学研究科学生



Fig.3 Gas pipeline network (Nankodai).

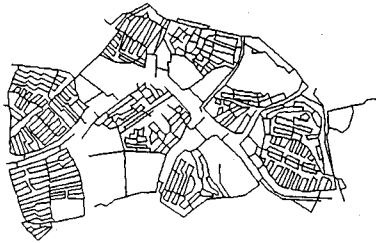


Fig.4 Water pipeline network (A section of Fujiwara).

網を表現しているとも考えられる。Fig.4は、藤沢市の上水道網である。末端部においては同様にループ構造により水の供給がなされており、ガス低圧管網と似ている。なお、配電網はネットワーク形態としては、ループ構造を備えているが、電気の流れはスイッチ類により調整されており、電流の経路としてはツリー型であることを記しておく。以上3つの異なったライフラインシステムから各々代表的な配管分布を示す3地域をとりあげたが、ここに見られるように主として、電気の場合はツリー型、ガス・上水道の場合はループ型のネットワーク形態をもって細部を供給している。ツリー型ネットワークの場合はその複雑な分岐の仕方が平面を埋め尽くす様子が、また、ループ型ネットワークの場合にはループを最小単位とするループの集合が平面を埋め尽くす様子がフラクタル性をもつように考えられる。

(2) フラクタル次元について

フラクタル性を定量化するものにフラクタル次元がある。整数値のみを対象とした経験的な空間の次元を拡張したもので、非整数値をもとり得る。次元の非整数値は図形の複雑さを定量化するものであると考えられ、その際、異なる非整数値の次元をもつ2つの図形を比較した場合、次元の高いほうが一般的にはより複雑である。本研究では「粗視化の度合いを変える方法」によるフラクタル次元は次のように定義されるとする<sup>2)</sup>。ある管路網図を含む任意の領域を一辺  $r$  のメッシュに分割し、少なくとも一本の管を含むメッシュの数を  $N(r)$  とする。その際、 $r$  を変えたときに  $r$  と  $N(r)$  の関係を両対数グラ

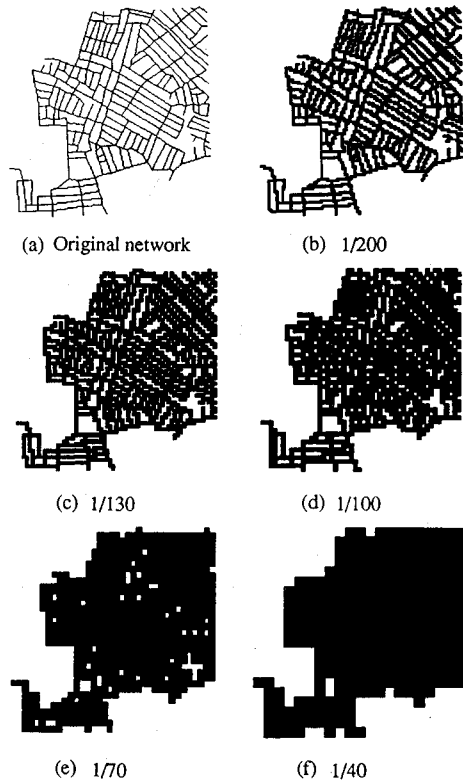


Fig.5 Meshed networks with different mesh sizes.

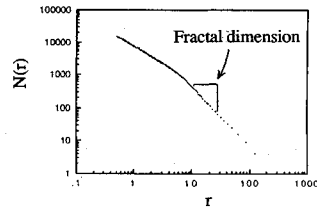


Fig.6  $N(r) - r$  relationship.

フにプロットして得られる直線の傾きの絶対値  $F$  をもって、この配管網は「フラクタル次元  $F$  の性質をもつ配管網である」とする。例として、前出の南光台団地 (Fig.3を参照) のガス低圧管網が様々な大きさのメッシュにより粗視化される様子およびフラクタル次元を求める直線をFig.5, 6に示す。ここでは、与えられた領域を最高200分割までできるときのメッシュ幅  $r$  で粗視化を実行し、Fig.5ではそれぞれ1/200, 1/130, 1/100, 1/70, 1/40に分割されたときのメッシュによる粗視化を示している。分割数の大きな、きめの細かいメッシュでは配管網の管一本一本を粗視化 (線を線で粗視化) することになり (Fig.5 (b)を参照)、また分割数の小さな非常に粗いメッシュでは領域を面で近似してしまうことになる (Fig.5 (f)を参照)。統計的な意味での自己相似性をもつ図形のフラクタル性を示す範囲の  $r$  の上限・下限

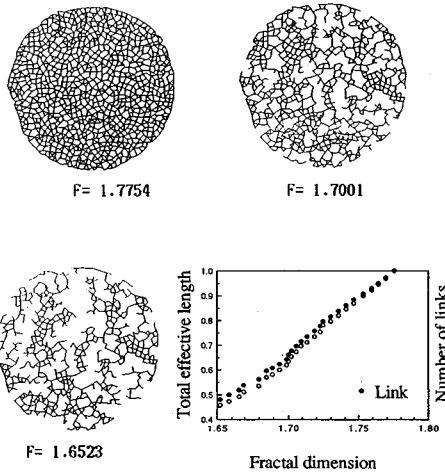


Fig.7 Change of random network.

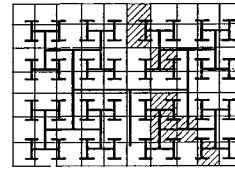


Fig.8 Model (1) (Tree network).

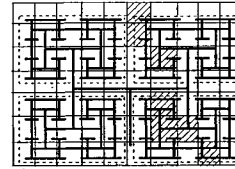


Fig.9 Model (2) (Tree network with loops).

については余り議論されていないが、本研究のように人工的な供給網を考慮する場合、完全なフラクタル性をもっていないので、次元の変化を用いて議論を進める場合には上限・下限の問題が、非常に重要になるので注意を要する<sup>3)</sup>。

本研究では、フラクタル次元の変化に注目しているのので、例としてFig.7に示すようなランダムネットワークを用いてネットワークの変化と次元の変化の関係を考察した。これからわかるようにネットワークの供給網が粗になって行くに連れてフラクタル次元の低下が起り、さらに総延長の低下とはほぼ比例関係にあることがわかった。また、この範囲内でのフラクタル次元の変化と総延長の変化の関係はリンクの数の変化のそれとよく似た傾向にある。それは、ここで対象としたような、各リンクの方向性はランダムではあるが、その長さの比較的一様なネットワークにおいては、リンクの数がリンクの総延長と比例関係にあり、フラクタル次元の変化はリンクの数の変化に支配されることに起因するようだ。

さて、本研究の解析対象としているネットワークの中には、領域の部分において網の密度に高低があり、一種の多重構造を形成しているものもある。(例えば、Fig.4の藤沢市の上水道を参照)。フラクタル次元は対象としている領域全体における配管形態の複雑さを平均化した値であるから、部分における密度の高低はフラクタル次元によっては表現されない。同じフラクタル次元Fの図形であっても、その配管形態は必ずしも一様ではない。さらに詳細な網密度の分布の様子を検討するには、フラクタル次元以外の指標が必要であると思われる。

以上より、視覚に訴えるネットワークの複雑さが、フラクタル次元により定量化されることがわかり、各ライフラインシステムにおいては、複雑さを表現する基本構造に違いがあることもわかった。次に、震害などによる

物理的被害の意味を、ネットワーク形態をも考慮して、機能障害に関係付け、供給率とフラクタル次元の変化について考察する。

### 3. フラクタル解析による供給システムの機能評価

ここではFig.8および9に示すようなツリーモデル(これを以下モデル(1)とよぶ)およびループを含んだツリーモデル(これを以下モデル(2)とよぶ)にフラクタルを用いた被害評価に関するシミュレーション結果を報告する。ガス低圧管路網は、ループによる供給経路の複雑化で、わずかな箇所「管路切断」(物理的被害)が大規模な「供給能力の低下」(機能障害)を起こさないようにしている。しかし、それが解析を複雑にし、さらに一箇所の物理的被害がもたらす機能的被害を不明確にしている原因でもある。Fig.8のモデル(1)では供給経路が限定され、「接続」が「供給可能」を表し、物理的被害が生じると被害箇所より先の末端部に機能的被害が生じるというように各々の関係が一意に定まる。Fig.9のモデル(2)では、ツリー構造をなす幹線から供給される4つの供給領域にループ構造を設け、より現実に近い配管網を示すが、各供給領域において、物理的および機能的被害の間の関係はモデル(1)のように一意的ではない。

#### (1) フラクタル解析の有用性を示す例

この解析での物理的被害の与え方は次のようである。

- ① 管路網の敷設されている領域を矩形に取り、1辺100mの正方形メッシュに分割する。
- ② 各メッシュごとに地盤などの性質をもとに危険度を定める。ここでは、Fig.8, 9の斜線の部分が被害の起きやすい地盤であると仮定し、この部分だけに物理的被害を生じるとした。
- ③ この危険度の高いメッシュに含まれる管路網のノードを図示するとFig.10のようになる。多くの震害の報

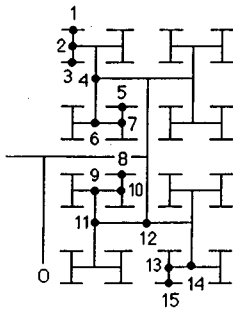


Fig.10 Nodes in high risk meshes.

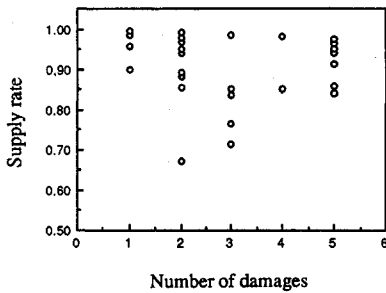


Fig.11 (a) No correlation between number of damages and supply rate for Model (1).

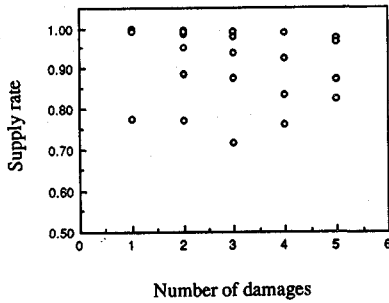


Fig.11 (b) No correlation between number of damages and supply rate for Model (2).

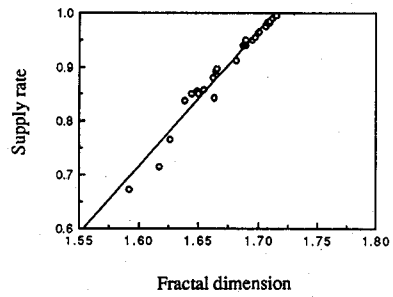


Fig.12 (a) Supply rate-fractal dimension relationship for Model (1).

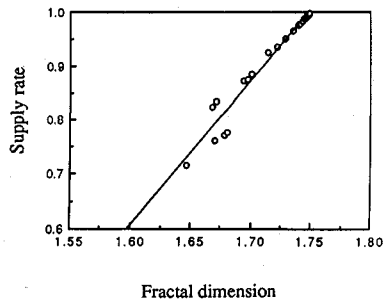


Fig.12 (b) Supply rate-fractal dimension relationship for Model (2).

$$\text{供給率} = \frac{\text{地震被害発生後の供給可能なリンク長の総和}}{\text{地震被害発生前の供給可能なリンク長の総和}}$$

それぞれ、特色ある配管形態上に分布した物理的被害のそのネットワーク上における「被害」の意味を考慮し、Fig.8の配管網においては、物理的被害を受けたノードより先の末端部は供給能力を失うと考え、被災前の配管網図からその部分を消去し、被災後の配管網を得た。さらに、Fig.9の配管網については物理的被害箇所の発生により、供給不能となった領域に含まれる管路を消去することで、被災後の配管網図を得た。このようにして得られた被災後の配管網のフラクタル次元は、粗視化の度合いを変える手法で求めた。

(2) モデルにおける解析結果

解析結果を、供給率と物理的被害件数および供給率とフラクタル次元の関係でそれぞれグラフ化したのが、Fig.11 (a), (b)と Fig.12 (a), (b)である。Fig.11においては、供給率と物理的被害件数の間に明確な相関関係が見いだせず、同じ件数の被害であってもその発生箇所あるいは分布の状態により様々な程度の被害として評価される。したがって、これまでの管路長当たりの物理的被害の件数による被害の評価方法は必ずしも管路網の機能的被害を反映していないことがわかる。それに比べ、Fig.12に示した供給率の変化とネットワークの持つフラクタル次元の変化とは非常に強い相関関係があ

告から、ノードに被害が発生しやすいと考えられるので、この15個のノードに対して、1件から5件までの被害を任意に与える。ここでは、30通りの被害分布の場合について、フラクタル次元の解析を行った。(ただし、供給不可能になった地区内で生じた被害は無視している。例えば、Fig.10において、ノード14で被害が発生している場合には、それより先端部にはガスが供給されないの、仮にノード13・15で被害が発生してもそれらの被害を無視する。) こうして決定された被災後の管路網に対して、別々に供給率とフラクタル次元を求めた。

供給率は被災前の供給可能な総リンク長に対する被災後のその比率として、次のように定義する。

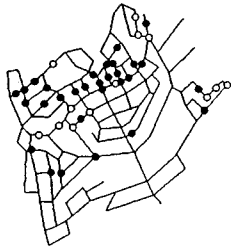


Fig.13 (a) Gas pipeline network (Kuromatsu).



Fig.13 (b) Gas pipeline network (Nankodai).



Fig.13 (c) Gas pipeline network (Midorigaoka).

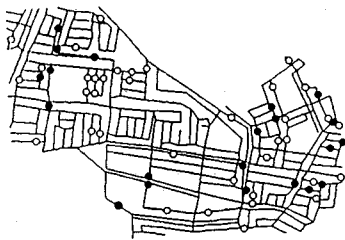


Fig.13 (d) Gas pipeline network (Shougen).

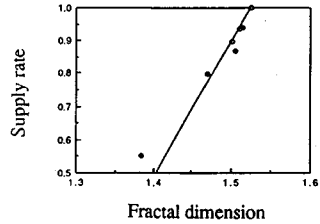


Fig.14 (a) Supply rate-fractal dimension relationship (Kuromatsu).

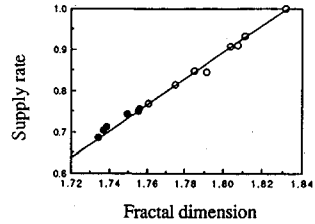


Fig.14 (b) Supply rate-fractal dimension relationship (Nankodai).

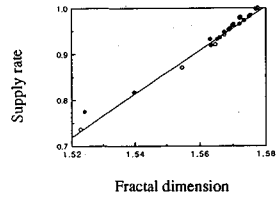


Fig.14 (c) Supply rate-fractal dimension relationship (Midorigaoka).

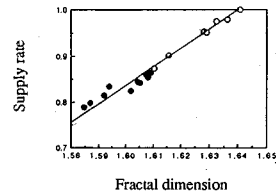


Fig.14 (d) Supply rate-fractal dimension relationship (Shougen).

り、フラクタル次元がループ構造を備えた配管網についても機能的被害と対応する可能性を示すと考えられる。

#### 4. ガス低圧管網の被害評価

前出のモデルを用いての解析結果を裏付けとし、同様な解析を1978年宮城県沖地震時に特に被害が大きかったといわれている黒松・南光台・緑が丘・将監の盛土における4つの仙台市の丘陵を造成した住宅地域について行なった。Fig.13 (a)~(d)に被災前のガス低圧管網を示す。なお、図中の○は実被害、●は仮想被害を示し、実被害に基づいて得られたフラクタル次元と供給率の関

係がFig.14 (a)~(d)に示されている。ここでの、仮想被害は、上水道管の被害発生位置に注目し、その近くを通るガス管路に対して与えた被害であるとする。なお、各グラフ上には、仮想被害に基づいたフラクタル次元と供給率の関係をも示してある。各々、フラクタル次元の低下と供給率の減少には強い相関関係のあることを示している。緑が丘を例にとると被災後には供給率が74%まで低下し、その減少の様子を示す関係がほぼ直線で近似される。その際、仮想被害に基づいて算出されたフラクタル次元と供給率を示す点は、ほぼ上述の直線近傍に集中する。このことより、宮城県沖地震と同様な規模の

地震が発生し、同様な被害が他の地域に発生したとしても、フラクタル次元と供給率の関係は、この直線で表現できるものと思われる。予想される地震に対する供給率の低下とフラクタル次元の関係は、ここで得られたグラフによって表現される。将監の図においての実被害によるネットワークのフラクタル次元の変化1.64(被災前)から1.61(被災後)にたいして、供給率は100%から87%に変化するが、実被害箇所を様々にとって次元の変化を見てみると、いずれもその直線上にあることがわかる。さらに、宮城県沖地震よりも大規模な地震に見舞われたと仮定したときの被害(仮想被害)はいずれも実被害のみにより決定された直線上にあることから、この相関関係が被害規模の推定に応用できる可能性を示している。

### 5. あとがき

本研究では、非常に複雑なネットワークを形成しているガス低圧管などの末端部を含むネットワークシステムにおける震害の新しい評価方法について考察した。現在、このレベルでの作業は、現場のエキスパートの判断に基

づいた被害評価により、復旧対策が計画され、実施されている。ここでは、ネットワーク自身の持つ形状特性とそのネットワーク上における物理的被害の意味を失うことなく、適切かつ、客観的な被害評価ができる方法をフラクタル次元を用いて提案した。

今後、地盤特性やネットワーク構造物の材料特性などと被害分布の関係を解析過程に取り込み、ここで提案された被害評価方法をより汎用性のあるものにすると同時に、ネットワークのフラクタル性についての要因分析なども行ない、ネットワークの形態についての基本的な理解をさらに深めたい。

### 参 考 文 献

- 1) Mandelbrot, B.B : The Fractal Geometry of Nature, Freeman, 1982
- 2) 例えば、高安秀樹：フラクタル、朝倉書店、1987
- 3) 佐武正雄・中川昌美：埋設管網の被害評価におけるフラクタルの応用、形の科学第13回シンポジウム予稿集、1987

(1990.3.29・受付)

## EARTHQUAKE DAMAGE EVALUATION OF LIFELINE SYSTEMS BY FRACTAL DIMENSION

Masami NAKAGAWA, Masao SATAKE and Akihiro INOMATA

A new method of damage evaluation for complex secondary networks of lifeline systems is proposed. A similarity between natural and man-made supply network systems are explored. Rivers and veins are examples of the former and gas and water pipelines are those of the latter. It is shown that both possess fractal nature in the statistical sense so that any part of an abovementioned network is statistically similar to that of any other parts or that of an entire network. When a lifeline network system is received seismic damage, the total effective length of the network, which is defined as the supply rate, decreases. Using the actual data from Off-Miyagi Earthquake in 1978, it is found that the change in the total effective length is linearly related to the change in the fractal dimension. It is also found that the supply rate due to hypothetical damage can be estimated from the linear relation obtained thoroughly from the actual data. This shows a possibility that a supply rate-fractal dimension curve may be used to predict the extent of damage due to an upcoming event.