

フラクタル次元を用いた人間行動動線の 定量的分析

横山秀史*・永田 茂**・山崎文雄***・
片山恒雄****

緊急時の人間行動を定量化するための指標として、動線のフラクタル次元を用いることを提案し、迷路を用いた被験者実験の結果と、過去の火災事例に適用して有用性を検討した。その結果、フラクタル次元が、脱出時間、歩行距離、行動範囲などで評価できない人間行動の複雑さの度合を定量的に表していることがわかった。

Keywords : evacuation, human behavior, fractal dimension

1. はじめに

著者らは、これまでに緊急時の人間行動に関する基礎データの収集を目的として、被験者による避難実験を行い、その結果に関して報告してきた^{1)~3)}。これらの報告では、被験者実験で観察された行動形態を、著者らの主観をもとに定性的に分類し、この分類で得た代表的な行動形態と脱出時間や被験者個々の性格との関連について調べている。緊急時の人間行動のような複雑な図形情報を分類する際、観察者の主観に基づく定性的な分類は、状態・現象を包括的にとらえられる利点を持つが、一方では分類を行う人の偏見や独断を含む結果となったり、コンピュータを用いた定型的な処理が難しいなどの欠点がある。

近年のコンピュータの計算能力の飛躍的向上を背景として、画像処理の分野などでフラクタルが用いられるようになってきているが、この中に非整数値の次元で表されるフラクタル次元を用いて複雑な図形の特性を定量的に表現する方法がある。フラクタル次元は、地形の定量的評価、河川流域・流量の評価など様々な分野で応用されている⁴⁾。土木構造の分野でも、フラクタル次元で定量化されたガス導管網の形状と地震時の被害の関係を調べた研究などが報告されている⁵⁾。

本報告では、上述のように図形の定量化手法としての応用が進んでいるフラクタル次元を用いて、緊急時の人間行動形態の定量化の方法を示している。さらに、著者らが行った被験者による避難実験の結果や、過去の災害事例などを例題として、避難中の行動距離・行動範囲・避難に要した時間・歩行速度などの行動特性と行動形態

から求めたフラクタル次元の関係について調べ、今後のコンピュータを用いた人間行動シミュレーションに応用していくことを考えている。

2. フラクタル次元を用いた人間行動の定量化

(1) フラクタル次元

フラクタルとは、Mandelbrotによって提案された概念であり、海岸線や山の起伏や川の形のように特徴的な長さをもたないような図形や構造、現象などの総称⁴⁾とされている。このようなフラクタルを定量的に表現するための量として考え出されたものがフラクタル次元である。これは非整数値をとりうる次元であり、フラクタル図形の複雑さを表現している。

フラクタル次元の実用的な定義方法としては、1) 粗視化の度合を変える方法、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などがある。これらのいずれの方法を用いた場合でも、次元の算定結果が不自然に異なる結果とはならないことが報告されている⁴⁾。

上記の方法のうち「粗視化の度合を変える方法」は、計算処理をコンピュータで実行しやすいために、これまでの研究でもしばしば用いられている。この方法は、①フラクタル図形を円や球、線分や正方形、立方体といった特徴的な長さ r を持つ基本図形で近似し、対象とするフラクタル図形の 1 部を含む基本図形の数 $N(r)$ を数える。②基本図形の長さ r と $N(r)$ を両対数グラフに描き、 $N(r) \propto r^{-D}$ の関係を満足するフラクタル次元 D を決定する方法⁴⁾である。

(2) フラクタル次元と人間行動

本報告では、緊急時の動線のフラクタル次元を「粗視化の度合を変える方法」で定義し、以下の解析で用いている。具体的には、図-1 に示すように、平面上に描か

* 学生会員 工修 東京大学大学院博士課程
(〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

** 正会員 工博 東京大学生産技術研究所 講師

*** 正会員 工博 東京大学生産技術研究所 助教授

**** 正会員 Ph.D. 東京大学生産技術研究所 教授

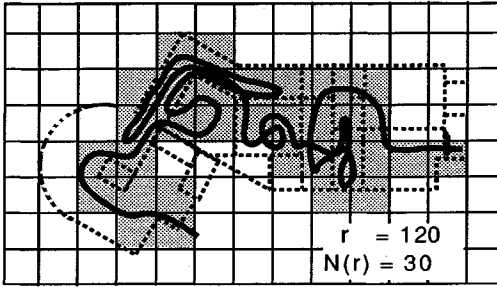


図-1 粗視化の度合いを変える方法によるフラクタル次元の算出例

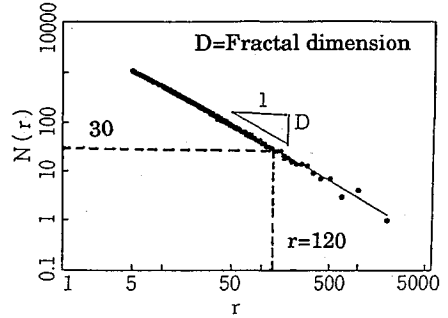


図-2 $r-N(r)$ 関係とフラクタル次元

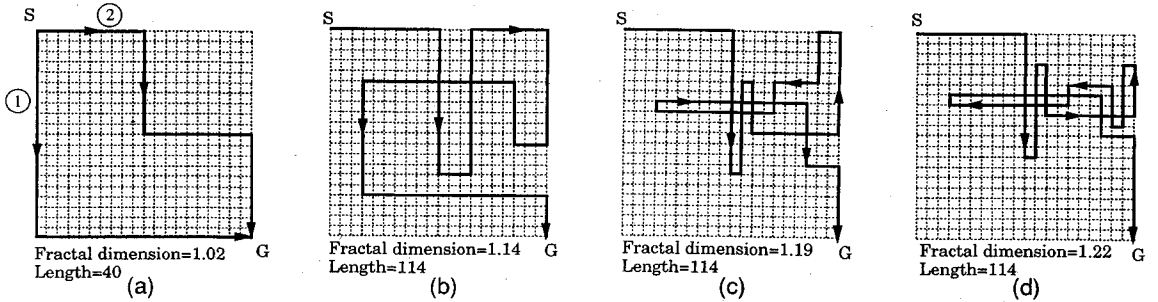


図-3 動線形状とフラクタル次元の関係

れた動線の上に1辺の長さ r のメッシュを重ね、動線の一部でも含むような正方形を数え上げ、それを $N(r)$ とする。 r を変化させたときの r と $N(r)$ の関係を図-2のように両対数グラフ上に描き、 $N(r) \propto r^{-D}$ の関係を満たすフラクタル次元 D を求めている。なお、文献4)、5)でも指摘されているように、粗視化の度合いを変える方法でフラクタル次元を決定する場合、メッシュ幅 r の上限値・下限値の設定が D の算定結果に影響をあたえるため、慎重に決定する必要がある。

ここで、人間行動のフラクタル次元が持つ意味を示すための簡単な例として、図-3に示すような 21×21 の格子を左上角の点 S からスタートして右下角の点 G まで歩行する場合を考える。まず、図-3(a)に示した2本の動線は、ともに最短距離で S から G まで歩行した場合である。このときのフラクタル次元はともに1.02で、後戻りなどが全くない単純な動線形状の場合には直線の次元である1.0に近い値となる。次に、歩行距離がいずれも114の(b)、(c)、(d)の3本の動線を比較すると、歩行距離が同じであっても、細かい後戻りやループが多い、迷ったような動線になるほどフラクタル次元が大きくなっていることがわかる。このように、フラクタル次元の値は動線形状の複雑さを定量的に表しており、出口に到達するまでに迷うほど動線のフラクタル次元が大きくなる。

3. フラクタル次元を用いた人間行動の評価

(1) 避難行動の定量化に必要な指標

2.で検討したように、動線のフラクタル次元は、行動の複雑さを定量的に表現している指標と考えることができる。以下では、行動を定量化する複数の指標と動線のフラクタル次元との関係を詳細に検討する。

人間行動に関する既往の研究を表-1にまとめた。これより、人間行動特性を定量化するための指標としては、行動パターン分類、避難に要した時間(脱出時間)、避難中の歩行速度、避難中の歩行距離、避難中の行動範囲などがあげられる。これらのうち、行動パターンは前述のとおり主観的な要素が強く、客観性にとぼしい。また、脱出時間は、特に火災発生を考えた場合には、生死に直接結びつく重要な要因である。しかし、避難するまでの時間が同じであっても、積極的に脱出口を探して動いた人の行動と、一箇所に留まっているような行動を同一のものとして取り扱うことはできない。また、脱出するまでの歩行距離や歩行速度を指標とした場合には、同じ場所を右往左往していた人と、広い空間を歩き回っていた人の行動を区別することが困難になる。このように、行動パターン・脱出時間・歩行速度・歩行距離などは避難の成否にかかわる重要な要因ではあるが、行動範囲も含めたこれらの指標は避難行動の大要を示すものであり、避難の途中経過や避難時の詳細な行動をとらえて定量化する場合、上記の指標だけでは不十分である。

表一 人間行動に関する既往の研究で用いられている行動特性指標

著者	種類	対象	行動特性を表すための指標	個人特性を表すための指標	備考
渡部 ⁶⁾	実験	格子状迷路	正誤、誤りの種類、最初に誤るまでの交差点数、歩行速度など	なし	行きと違った教示ルートと同じ経路をとって戻らせる
北後 ⁸⁾	実験	迷路	歩行速度、経路選択の傾向など	職業	
忠末 ⁹⁾	実験	広域	目的値への到着率、経路選択傾向、実際の経路と主観的経路の比較(角度および距離)など	なし	火のくる方向と避難場所の方向を指示し、歩かせる
松下・岡崎 ¹⁰⁾	実験	巨大迷路	行動パターン分類	なし	
舟橋 ¹¹⁾	実験	建物内	行動パターン分類、教示ルートとの一致度	なし	教示ルートと同じ経路を再現させる
横山・永田 ¹⁾⁻³⁾	実験	迷路	脱出時間、行動パターン分類	性別、年齢、職業、性格尺度	
舟橋 ¹²⁾	調査および実験	街路	行動パターン分類、方向変換回数など	居住者と初訪者	格子状街路の住宅地での経路選択
井谷・室崎 ¹³⁾	日常動線の調査	地下街	行動パターン分類・平均滞在時間など	性別、年齢、目的、来街頻度、空間認識度、同伴者数など	
奥山・荒木 ¹⁴⁾	日常動線の調査	地下街	歩行速度、動線の総延長、滞在時間など	なし	平均的な動線の利用可能領域などを指標として、地下街の複雑さを調査
位寄 ¹⁵⁾	シミュレーション	建物内	避難開始時刻、行動目標など	安全欲求水準、イメージ評価の類型と個人差など	
森脇・松本 ¹⁶⁾	シミュレーション	広域	避難者や死者の分布	とりやすい避難行動の割合を各メッシュごとに設定	
仲谷・荒屋 ¹⁷⁾	シミュレーション	建物内	行動目標など	耐久時間、判断の早さ、移動速度など	
小坂・堀口 ¹⁸⁾	シミュレーション	広域	死者発生地点と死者数を関東地震時と比較	なし	対象は関東地震時の日本所区・深川区
森田 ¹⁹⁾	災害事例調査	建物内	各人の行動を記録	各人の属性(職業など)	大阪千日デパート火災時の行動調査
堀内・船井 ²⁰⁾	災害事例調査	建物内	脱出を試みた避難口を順に列挙	各人の属性(職業など)・従業員、ホステスについては出勤年数もあり	大阪千日デパート火災時の行動調査その他、2事例については、避難行動の傾向や動線形状を示している

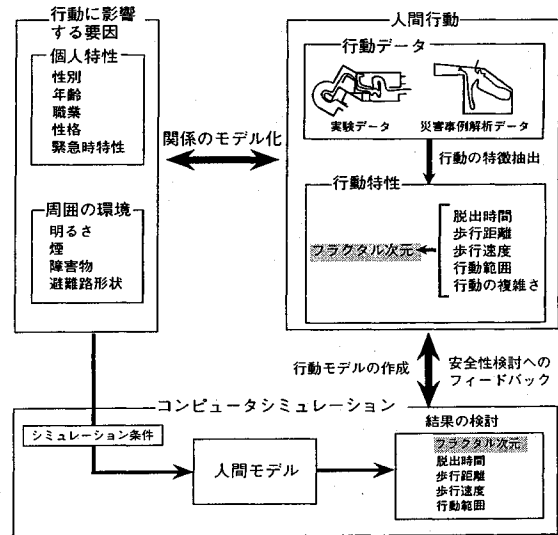
そこで本研究では、動線形状が直線的であるか、面的な広がりを持った形状であるかなど動線の複雑さを表すとともに、避難行動の総合的な要素も含んでいるものと考えられる動線のフラクタル次元を中心に据えた人間行動の定量化方法を提案する。以下の(2)では著者らが迷路を用いて行った実験のデータを、(3)では実際の災害時の避難行動のデータを例として、動線のフラクタル次元と従来から用いられている脱出時間・歩行速度・歩行距離・行動範囲の関係に関して検討を行う。著者らの人間行動に関する研究におけるフラクタル次元の位置づけを図一4に示す。

(2) 迷路実験時の行動へのフラクタル次元の適用例

以下に、著者らが行った迷路実験結果¹⁾⁻³⁾を例としてフラクタル次元と他の行動指標の関係について検討した結果を示す。

迷路実験は、通路幅約1mの小規模な迷路を用いて、全部で40人の被験者に対して行い、各人の迷路内での行動や脱出時間などを調べたものである。この迷路には床面にマット状のセンサーが設置してあり、被験者の位置を外部からモニターできるようになっている。実験にあたっては、マットセンサーのモニターパネルの前にビデオカメラを設置し被験者の行動を記録した。実験は、迷路内部の煙の有無などの条件を変えて被験者1人につき実験ケース1(1回目、煙なし)、実験ケース2(2回目、煙あり)の2回を行った。

図一5に、文献1)の検討で得られた3つの行動パターンを示す。ここで、行動パターン1はほとんど迷わずに脱出したパターン、行動パターン2はかなり迷っていた



図一4 人間行動の研究の全体フローとフラクタル次元の位置付け

ものの方向感覚は失っていないと思われるパターン、行動パターン3は完全に迷っており方向感覚も失っていたと思われるパターンである。図一6に迷路実験時の40人の被験者の行動パターンとフラクタル次元の関係を示すが、行動パターン1, 2, 3の順にフラクタル次元が大きくなっており、フラクタル次元が行動パターンなどの主観的な評価とよく対応していることがわかる。

図一7に迷路実験時の歩行速度とフラクタル次元の関係を示す。この図より、一部の被験者を除けば歩行速度は0.2~0.4 m/sの範囲にあり、フラクタル次元による

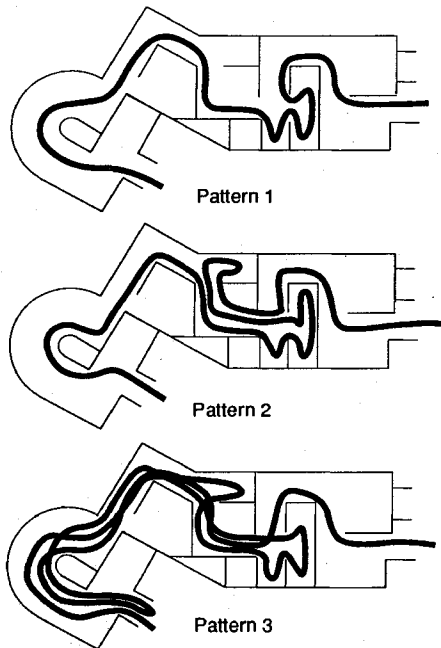


図-5 迷路実験で観察された代表的な3つの行動パターン¹⁾

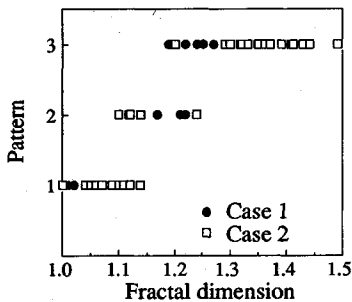


図-6 行動パターンとフラクタル次元の関係

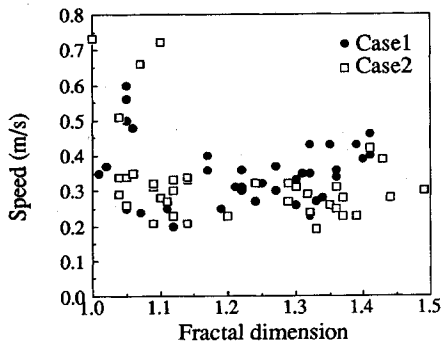


図-7 フラクタル次元と歩行速度の関係

変化はみられない。また、男女別の平均はともに約 0.33 m/s で、性別による違いは小さい。北後による実験³⁾においても、同様の歩行速度が得られており、暗闇での歩行速度は個人差が比較的小さい。暗闇で壁伝いに探索

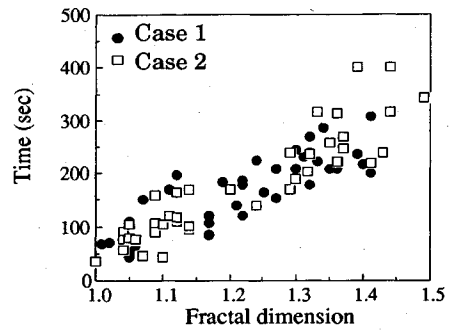


図-8 フラクタル次元と脱出時間の関係

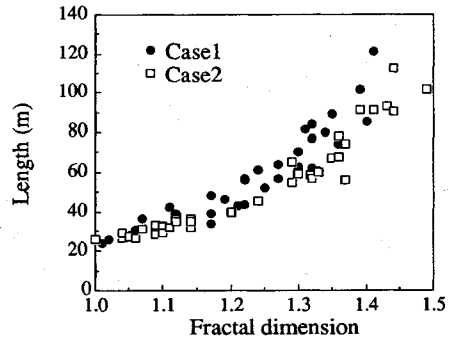


図-9 フラクタル次元と歩行距離の関係

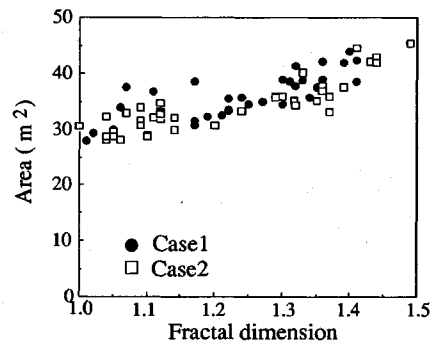


図-10 フラクタル次元と行動範囲の関係

しながら行動する場合には制約が多く、行動能力の違いがあまり出ないため、このような結果になったものであろう。数人の被験者の歩行速度が特に大きいのは、実験時に照明を消して迷路内を暗くするタイミングが遅れたために、ほとんど迷わずに素早く行動できたためである。

次に、図-8 に動線のフラクタル次元と脱出時間の関係を、図-9 にフラクタル次元と歩行距離の関係を、図-10 にフラクタル次元と行動範囲の関係を示す。既往の研究では行動範囲を明確に定義したものが少ないため、本論文では行動範囲を一定の格子幅 r で粗視化したときに動線を覆っている正方形の面積の合計として定義している。ここでは格子幅 r が 1 m の場合の結果を示す。

図-8, 9, 10 より、動線のフラクタル次元が大き

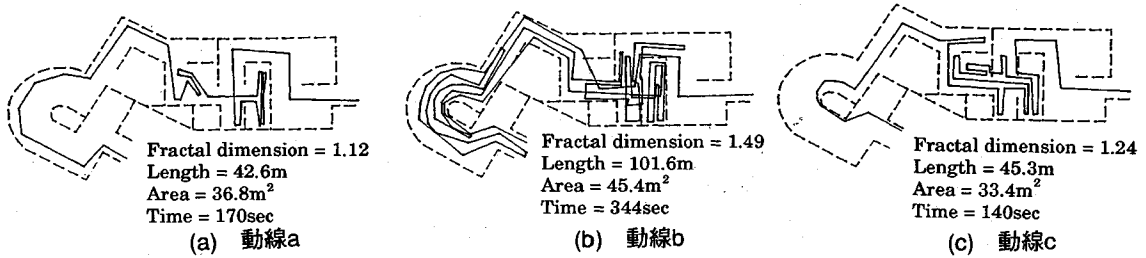


図-11 迷路実験時の3人の動線の比較

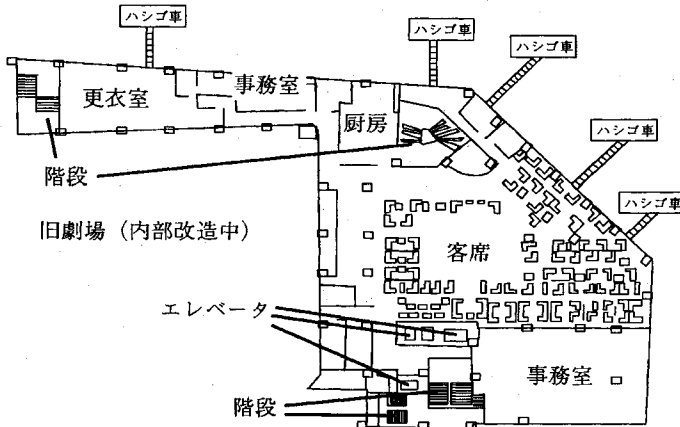


図-12 千日デパートビル平面図¹⁹⁾

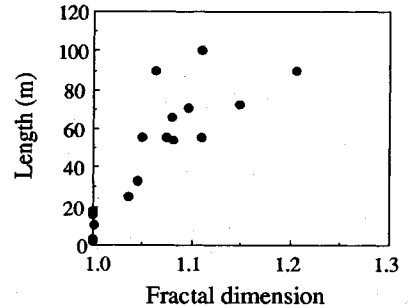


図-13 フラクタル次元と歩行距離の関係

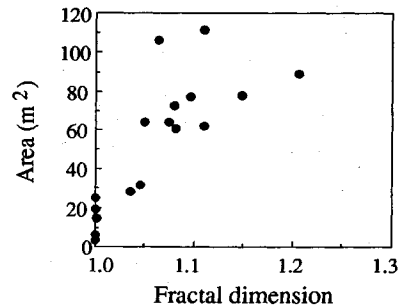


図-14 フラクタル次元と行動範囲の関係

なるにしたがって実験時の脱出時間、歩行距離、行動範囲のいずれもが大きくなる傾向があることがわかる。これは、実験に使用した迷路が小さいうえに、行動の開始点と終点がそれぞれ迷路の入口と出口に限定されているなど、行動の自由度が低いことが一因と考えられる。しかし、これらの図を詳細に検討すると、脱出時間や歩行距離、行動範囲が等しい場合にもフラクタル次元はかなりの幅をもって分布していることがわかる。

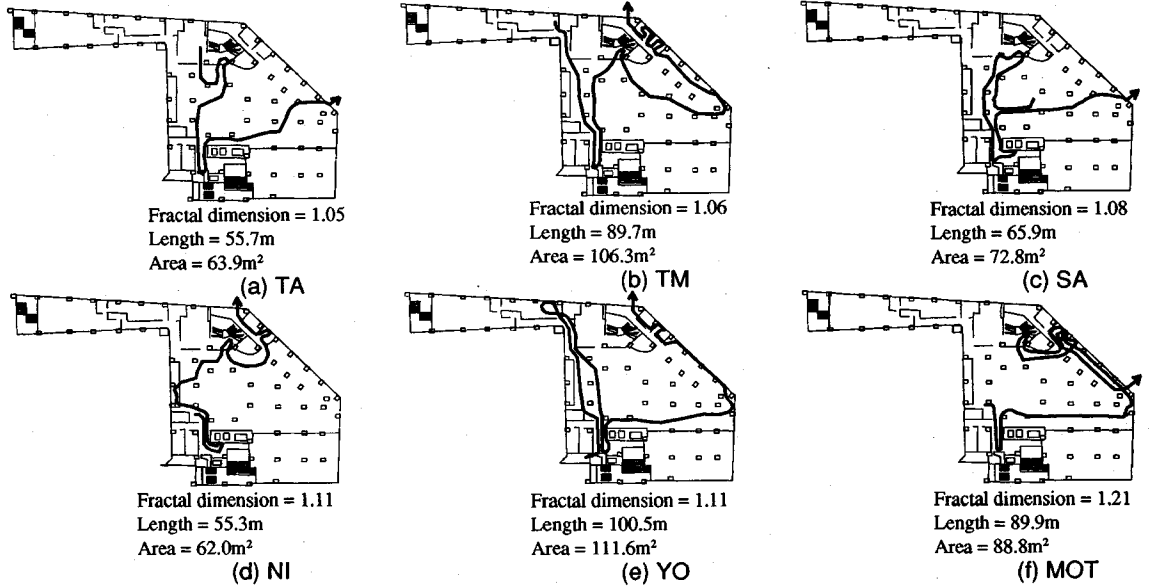
ここで、実験時に観察された3人の被験者の動線を図-11に示す。まず、動線aと動線bでは、簡単な形状の動線aに比べ、複雑な形状の動線bの方がフラクタル次元・脱出時間・歩行距離・行動範囲のいずれの行動指標も大きい。一方、動線aとcは迷路内のほぼ同じ場所を通過しているが、動線cの方が同じ場所を何度も行き来しているために複雑な動線となっている。このとき両者の脱出時間・歩行距離・行動範囲などには大きな違いがなく、これらの指標のみでは両者の行動の違いを十分に表していないが、フラクタル次元Dを計算して比較してみると、複雑な動線cの方がaよりも大きくなっている。

このように、行動の自由度の小さい、小規模な迷路における行動を定量化する場合においても、従来用いられてきた指標のみでは行動の特徴を十分に表現できていな

いといえよう。

(3) 火災時の行動定量化へのフラクタル次元の適用例
次に、大阪千日デパートビル火災時の避難行動^{19),20)}の定量的評価に関する適用例を示す。千日デパートビル火災は1972年5月に大阪で起きた火災で、118名の死者を出している。本研究では、生存者の供述書を中心にとめられた報告¹⁹⁾にもとづき、同報告書において森田が生存者の供述から再現した動線形状について検討を行った。したがって、死亡者の行動については検討対象としていない。また、脱出時間や歩行速度についても不明であるなど、情報はある程度限定されている。千日デパートビルの平面図を図-12に示す。

図-13に歩行距離とフラクタル次元の関係を、図-14に行動範囲とフラクタル次元の関係を示す。ここで、行動範囲は格子幅1mで粗視化したときに動線を覆っている正方形の面積の合計である。これらの図より、フ



図一15 千日デパートビル火災時の6人の避難行動¹⁹⁾の比較

フラクタル次元が大きくなるのに従って、歩行距離、行動範囲ともに大きくなる傾向はみられるが、ばらつきはかなり大きい。また、歩行距離と行動範囲の分布は非常によく似ている。これは、同ビルは全体が一つの大きな部屋となっており、行動の自由度が大きいいため、同じ場所を何度も通過するような行動が起こりにくく、結果として歩行距離とほぼ比例する形で行動範囲が大きくなったものであろう。

図一15にTA, TM, SA, NI, YO, MOTの6人の避難行動の動線を示す。まず、TAとNI, TMとMOTの動線を比較すると、歩行距離や行動範囲はほぼ等しいが、フラクタル次元には違いがある。また、YOとMOTでは、YOのほうが歩行距離、行動範囲とも大きい。このように、歩行距離や行動範囲が大きくても必ずしも複雑な動線形状になっておらず、歩行距離、行動範囲などの、従来から用いられている指標だけでは行動の違いを充分表現できていない。

次に、全体としての動線形状が似ている場合であっても、動線に細かな折れ曲がりや引き返しが多かったり、同じ場所を何度も往復するような行動をとると、動線のフラクタル次元は大きくなる。TAとSAの動線を比較すると、2人とも同じ2箇所の階段から避難を試みた後に梯子車によって救助されており、全体としての動線形状はT字形で似ている。しかし、詳細に検討すると、TAと比べSAの行動には同じ場所を往復するなどやや無駄が多い点で、両者の動線フラクタル次元の違いに反映されている。

また、例えばNIの動線と他の動線の相対的な複雑さの違いを目で見て決定するのは困難であるが、フラクタル次元を求めれば定量的に定めることができる。このように、実際の災害時には迷路実験の場合と比べ避難行動の自由度が大きいため、動線形状の複雑さを主観的基準のもとづいて適切に分類することが困難な場合が多いが、フラクタル次元を求めることで、行動の特徴を定量的に評価することができる。

4. まとめ

本研究では、緊急時の人間行動を定量的に評価するための指標の一つとして、動線のフラクタル次元を用いることを提案し、著者らが行った迷路を用いた避難実験と、過去の火災事例の2つを例題として検討した。

まず、これらで観測された代表的な行動動線のフラクタル次元を求め、比較検討した結果、フラクタル次元が人間行動の複雑さを定量的に表していることが示された。また、既往の研究で用いられているおもな人間行動の特性指標である。脱出時間、歩行距離、行動範囲などが同じ値であっても、動線形状が大きく違う場合があり、従来用いられてきた指標のみでは人間行動の特徴を充分に定量化できていないことが明らかになった。

避難時の状況判断や迷いなどは、動線形状にある程度反映されるものと考えられる。例えば、動線が直線に近い単純な形状であれば、ほとんど迷わずに脱出口に到達しており、反対に動線形状が複雑であれば、その人が脱出口に到達するまでにかなり迷っていたものと考えられる。このとき、迷路実験のように入口と出口が限定され

ている場合には、最短経路をとったときの値を基準として用いることで、歩行距離や行動範囲から避難行動の特徴をある程度推定することができる。しかし、実際の災害時の場合は、避難行動を開始する場所が人によって異なるうえ、避難口も複数あるのが普通である。そのため、歩行距離や行動範囲の値が大きくなるにつれて動線形状が複雑になる傾向はみられても、ばらつきが非常に大きくなり、これらの尺度のみで個々の避難行動の複雑さを評価することは困難になる。

動線のフラクタル次元の防災面への応用の一つとしては、地下街などの安全性を定量的に評価する指標とすることなどが考えられる。具体的には、日常動線の調査やコンピュータシミュレーションによって安全な場所へ到達するまでの平均的な動線を調査し、それから求めたフラクタル次元を歩行距離などの指標と合わせて避難の面から見た安全度を総合的に評価することが考えられる。地下街などは、はじめて来た人でも迷わずに避難できるような簡明な構造であることが、防災上望ましい。危険な場所を発見し、改良するための資料を得るための手段として、フラクタル次元を応用しようであろう。

なお、建物や動線のデジタル化とフラクタル次元の算出などの作業は、当時中央大学卒論生の吉田優司君に協力して頂いた。記して謝意を表します。本研究は、平成3年度文部省科学研究費補助金（一般研究B、研究代表者 山崎文雄）による研究の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 横山秀史・永田 茂・山崎文雄・海老原学：迷路実験による緊急時の人間行動特性，土木学会論文集，No. 441/I-18, pp. 107~115, 1992.
- 2) 山崎文雄・永田 茂・横山秀史・大槻 明：避難行動の迷路実験結果，土木学会論文集，No. 441/I-18, pp. 203~206, 1992.
- 3) 片山恒雄・山崎文雄・永田 茂・横山秀史：緊急時における人間の避難行動に関する研究，東京大学生産技術研究所耐震防災工学研究室報告，Report No. 91-1 (15), 1991.
- 4) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，1989.
- 5) 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, pp. 177~182, 1991.
- 6) 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 第1報 歩行経路の記憶，日本建築学会論文報告集，No. 322, pp. 157~161, 1982.
- 7) 渡部勇市：迷路における人間の避難行動実験 第2報 歩行経路の学習，日本建築学会論文報告集，No. 340, pp. 169~176, 1984.
- 8) 北後明彦：煙の中における人間の避難行動実験—避難経路選択および歩行速度に関する実験的研究—，日本建築学会計画系論文報告集，No. 353, pp. 32~38, 1985.
- 9) 忠末裕美：広域避難を想定した実験歩行における経路選択行動についての分析，日本都市計画学会学術研究論文集，第21回，pp. 157~162, 1986.
- 10) 松下 聡・岡崎甚幸：巨大迷路における歩行実験による探索歩行の研究，日本建築学会計画系論文報告集，No. 428, pp. 93~100, 1991.
- 11) 舟橋國男：建物内通路における経路探索行動ならびに空間把握に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文報告集，No. 429, pp. 61~72, 1991.
- 12) 舟橋國男：格子状街路網地区における経路選択ならびに探索に関する調査実験，日本建築学会計画系論文報告集，No. 428, pp. 85~92, 1991.
- 13) 井谷文昭・室崎益輝・大西一嘉：地下街における要避難人員の日常動線に関する研究，日本建築学会近畿支部研究報告集，No. 5044, pp. 377~380, 1986.
- 14) 奥山健二・荒木正彦・福島駿介・吉田親史：情報環境に関する研究 第6報 地下街路空間と歩行行動の関係，日本建築学会論文報告集，No. 340, pp. 81~91, 1984.
- 15) 位寄和久：避難行動モデルに関する研究—火災状況の認識と心理状態を考慮したモデルの提案—，日本建築学会論文報告集，No. 325, pp. 125~132, 1983.
- 16) 森脇哲男・松本博文・江田敏男：大震災時の避難シミュレーション，日本建築学会論文報告集，No. 341, pp. 142~149, 1984.
- 17) 仲谷善雄・荒屋真二：ESCAPE II：情報処理的アプローチを用いた避難行動シミュレーションモデル，情報処理学会論文誌，Vol. 26, No. 4, pp. 609~616, 1985.
- 18) 小坂俊吉・堀口孝男：広域避難シミュレーション手法による大震災時の群集行動解析，土木学会論文集，No. 365/IV-4, pp. 51~59, 1986.
- 19) 森田耕市：プレイトウンにいた53名の人たち（大阪千日デパート火災より），火災，Vol. 23, No. 1, pp. 28~34, 1973.
- 20) 堀内三郎・船井美彦・北山啓三：ビル火災における避難行動の事例研究，火災，Vol. 23, No. 4, pp. 37~45, 1973. (1992. 1. 11 受付)

APPLICATION OF FRACTAL DIMENSION TO HUMAN BEHAVIOR ANALYSIS

Hidefumi YOKOYAMA, Shigeru NAGATA, Fumio YAMAZAKI and Tsuneo KATAYAMA

This paper proposes the use of the fractal dimension of evacuation paths as a quantitative index of human behavior. Using the data from a maze experiment and an actual fire, the adequacy of the fractal dimension as an index of human behavior was examined. From these investigations, the fractal dimension of the evacuation paths is found to be a good index to quantify the complexity of evacuation behavior.