

道路網形態のフラクタル次元解析による救急搬送に基づく有効圏域の設定手法

- 千葉市の救急搬送とフラクタル次元解析との関係性について -

○島崎 翔*¹ 大内 宏友*³
木村 敏浩*² 大平 晃司*¹

キーワード：救急医療 フラクタル次元解析 GIS 救急車両 道路網

1. 研究背景と目的

個と総体との関係性や物理的縮尺を持たないパターンの特徴を扱う科学として、フラクタル理論は様々な分野に応用されている。自然界は樹木から銀河系に至るまでフラクタル性を持つ形態のカスケード(多層構造)とし、それらの時間的変動もフラクタルとしてとらえられる。フラクタル次元*¹を用いた分析手法は、一見不規則な事象や形状の複雑さを定量的に示す事が可能であることから、建築・都市・地域計画分野の研究にも応用されつつある。都市構造の中で道路網の形態は、都市を特徴付ける因子の1つであり、交通・運輸・搬送機能等を様々な尺度で有する多層構造の1つと考えられる。

また、我が国における救急医療業務は、昭和38年より消防の任務として消防法上に位置付けられ、現在では我々国民の生命と身体の安全を守る上で不可欠なサービスとして広く認知されている。現在、社会不安や少子高齢社会の更なる進行に伴う疾病構造の変化等により、救急出動件数は増加の一途を辿っている。総務省消防庁の「平成21年度消防白書」によると、搬送人員はこの10年間で354万6739人から平成20年までに468万1447人まで増加している。

本研究は、道路ネットワーク(道路網)についてフラクタル次元解析を行う。生命を守る尺度として治療開始時刻に着目し、道路網のフラクタル次元が救急搬送との関係の中で、評価基準としていかなる意味を持つかを検証する。以上により、道路整備水準を設定する際の救急搬送の客観的評価の定量的手法の構築を行う。

本研究に関する既往研究として、水野ら^[1]は、中世のドイツ都市とイスラム都市の都市図をもとにフラクタル解析が都市街路形態の定量的な解析手法としての有効性を示した。また岡田ら^[2]は、道路網形態の特性を計量化する方法として、フラクタル次元を拡張援用したアプローチが有効であるとしている。牧ら^[3]は、微分フラクタル次元を用いて基本パターンによるシミュレーションならびに実道路網への適用を試み、基本パターンによるシミュレーションでは、微分フラクタル次元によって道路網の特徴である形状の違い、密度の違いを見ることができていることを示し、微分フラクタル次元によって道路網の特徴が示されることを明らかにした。

2. 既発表論文

これまで筆者らの研究室では、船橋市を対象とし、市内の道路網のフラクタル次元と、救急車両と平均移動距離や平均速度の関係について解析することで道路網形態の複雑性が救急搬送に及ぼす影響についての分析を行った^[4]。さらに、千葉市において地域空間情報に基づいた解析方法により時間帯別の救急隊の出動可能な人口数と高齢者数の観点から分析することで千葉市における救急医療の医療圏域を構築した^[7]。

また、都市空間におけるフラクタル性の計測を行うための基礎研究として、街区の立体モデルに点光源を配置し、拡散光から生じる陰影を含んだ画像(以下、陰影画像)をボックスカウンティング法によるフラクタル次元解析手法を確立した^[9]。さらに、実空間における都市環境イメージのフラクタル分析を江東・品川地域により行い、3次元都市空間において建蔽率・容積率による分析のみでは指標化できない認知的特性を提示でき、同時に地域住民のイメージ構造を解き明かすことへのフラクタル次元の有効性を確認した^[10]。

以上の成果をもとに本稿では、千葉県千葉市を研究対象地域とし、救急医療の救急搬送における有効圏域内の道路網を抽出し、有効圏域内の道路網のフラクタル次元と①交差点の数②有効圏域の面積③平均速度④有効圏域内の道路総延長距離⑤出動時間との関係性に関して考察を行う。以上により、実空間におけるフラクタル次元解析による分析手法について有効圏域を構築する際の分析手法としての有効性を検証する。

[救急業務の実施体制] (H. 13. 1. 1)



図1 千葉市における救急医療業務概要

3. フラクタル次元解析手法について

数学の分野において、次元の定義は数多く存在する。その代表的なものとして、相似次元、測定次元、被覆次元、容量次元等が挙げられる。これらは全てB, Mandelbrot によるフラクタル次元と関係がある。被覆次元は相似次元と測定次元の関係により求められ、容量次元は測定次元と被覆次元を拡張させた考え方である。相似次元、測定次元、被覆次元は明確な繰り返しによる相似形状に対して有効であり、道路網や海岸線などの実際に存在する不規則な形状に対しては容量次元が有効である。

本稿で用いるボックスカウンティング法^{*3}によるフラクタル次元解析は、解析対象画像の複雑性を容量次元として算出するものである。具体的にフラクタル次元解析は2値画像に含まれる黒色pixelの数をカウントすることで行われ、非整数の1~2のフラクタル次元を示し、値が大きいほど、一般に複雑性が高いとされる。(図2)

2値画像を一边r画素の正方形で被覆する時、対象とする画素数を含む正方形の個数を画素間隔rごとにN(r)とすると、以下の様な式が成り立つ。

$$N(r) \cdot r^D = C \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、Cは定数であり、この時のDがフラクタル次元となる。また、式(1)を変形すると

$$\log N(r) = \log C - D \log r \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。フラクタル次元DはlogrとlogN(r)の直線の傾きであり、最小2乗法により推定することができる。また、得られた回帰直線が良好な直線性(決定係数R²が高い)を示す時に解析対象画像のフラクタル性を持つことが確認できる。

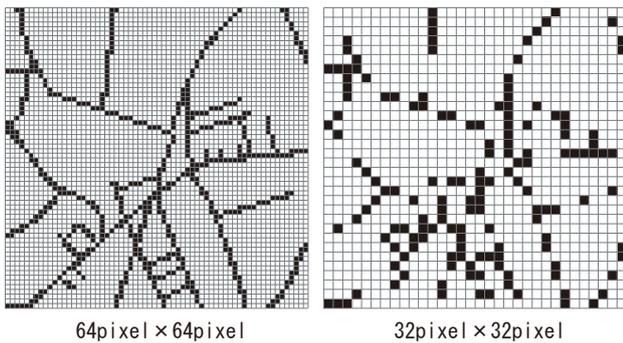


図2 ボックスカウンティング法(例)

表1 救急出動に関する記録(例:中央隊)

覚知時分	現着時分	現発時分	到着時分	要請現場町
4/01 00:21	4/01 00:27	4/01 00:30	4/01 00:33	葛城
4/01 01:00	4/01 01:06	4/01 01:16	4/01 01:25	院内
4/01 01:10	4/01 01:14	4/01 01:28	4/01 01:37	長洲
4/01 06:54	4/01 06:59	4/01 07:07	4/01 07:09	亥鼻
4/01 08:21	4/01 08:26	4/01 08:29	4/01 08:32	末広
4/01 10:14	4/01 10:17	4/01 10:25	4/01 10:32	新田町
4/01 11:34	4/01 11:37	4/01 11:48	4/01 11:53	港町
4/01 11:44	4/01 11:48	4/01 12:02	4/01 12:10	新千葉
4/01 13:29	4/01 13:34	4/01 13:51	4/01 14:14	新田町

4. 研究概要

4.1 研究対象地域の概要

本稿はGIS・GPSを利用した救急医療システムを運用している千葉県千葉市を対象地域とする。(図1)

4.2 救急出動に関する記録

本稿では、千葉市消防局の協力により得られた救急出動に関する記録を用いる。記録には月日、出動隊名、覚知時分、現場到着時分、現場出発時分、医療機関到着時分、帰署時分、要請現場区・町名、搬送先医療機関区・町名等が記載され、平成11年4月、平成12年4月の出動に関する全5649件を有効資料とする。(表1)(図3)

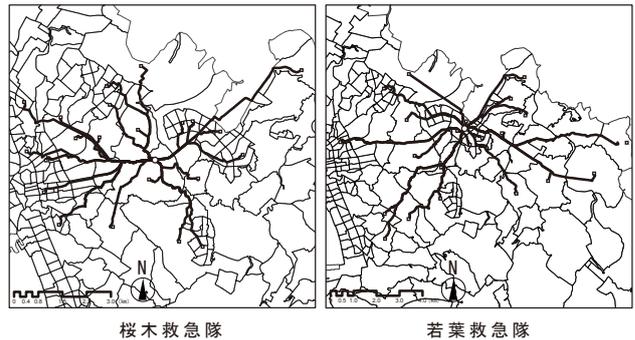


図3 救急隊から各町村の重心への経路図

5. 道路網のフラクタル次元解析による分析手法及び手順

道路網を地域空間情報としてとらえ、救急医療においての道路形態の影響の分析を行うために本稿ではArcGIS^{*4}を用い、国土地理院刊行数値地図2500を空間データ基盤とし、千葉市の道路網ネットワークデータを作成する。このデータを基に、救急搬送における有効圏域のフラクタル次元解析を以下のように行う。(図4)

- ①市内の消防署(全24救急隊)を数値地図上にプロットする。道路幅が3m以上の真幅道路を抽出し、数値地図の道路情報として長さを入力する。また、救急出動に関する記録により救急車両の平均速度、出動時間^{*5}を入力する。
- ②各救急隊から救急車両が、5分以内に到達できる範囲を有効圏域として算出し、可視化する。(図5)
- ③有効圏域内の道路網のフラクタル次元を、ボックスカウンティング法を用いて解析する。解析範囲として各救急隊の有効圏域全体が入る、最も広い範囲である14_大宮救急隊4.112×4.112[km]の正方形を用いる。(図6)
- ④有効圏域内におけるフラクタル次元と交差点数、面積などの要素との関係性についての分析を行う。

また、解析画像内に海水域が入る5地域のデータについては、ボックスカウンティング法でのフラクタル解析対象から海域によって道路網が欠損し、分析結果に影響を及ぼすため本稿では除外した。

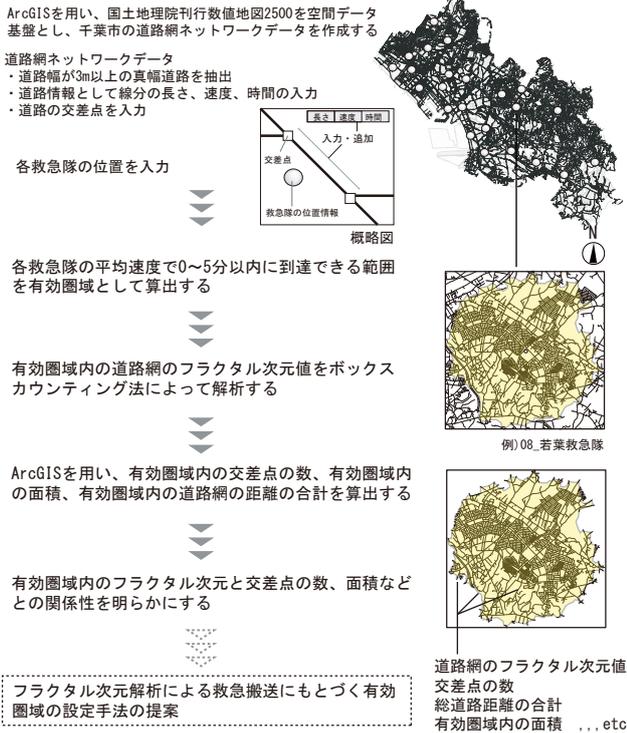


図4 フラクタル次元解析による救急搬送にもとづく有効圏域の設定手法の手順

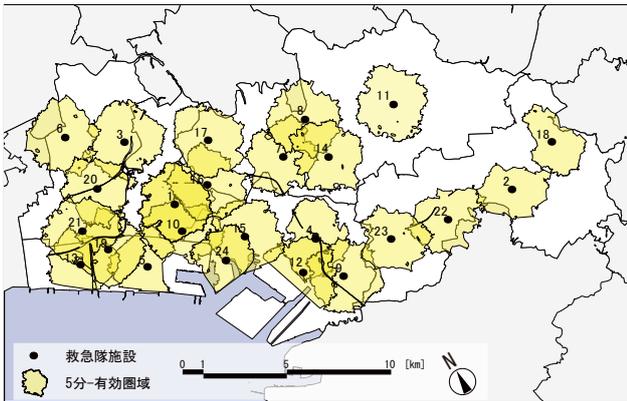


図5 ArcGISによる千葉市の救急隊における有効圏域図

6. 道路網ネットワークにおける分析結果

千葉県千葉市を研究対象地域とした救急搬送における道路網形態のフラクタル次元の関係性について以下の結果が得られた。

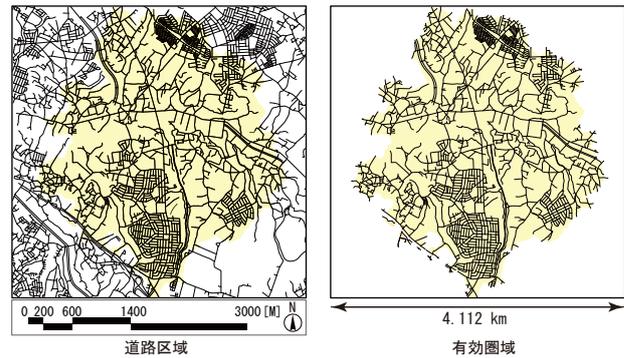
6.1 地域空間情報に基づくArcGISによる有効圏域の算出 (図4, 5, 6)

各救急隊の平均速度を用いて、5分以内の有効圏域を算出し、搬送時間と有効圏域内の交差点の数、総道路距離及び面積との相関を検証することができた。道路網に交差点が多いほど救急車両の搬送速度が遅くなっている。

6.2 有効圏域とフラクタル次元についての考察 (図7, 8,) (表2)

有効圏域内のフラクタル次元が高い道路網ほど交差点の数、総道路距離、面積が大きい値を示した。各要素とフラクタル次元は高い相関があるといえる。この結果により、フラクタル次元が高いほど道路が複雑なものとなり、救急搬送における運行に影響を及ぼすことがわかる。つまり、フラクタル次元が高いほど救急車両の要請現場への到着が遅れる場合があることが考えられる。

また、出勤時間とフラクタル次元との相関にも同等の結果が得られた。



14_大宮救急隊
 図6 各救急隊の有効圏域および圏域内の道路の抽出

表2 各救急隊のフラクタル次元と平均速度等の算出

NO.	救急隊	フラクタル次元(D)		平均速度 (km/min)	有効圏域内		
		道路区域	有効圏域内		面積(km ²)	交点(点)	総道路距離(km)
1	稲毛消防署	1.5427	1.4722	0.39	8.787	3512	227.115
2	越智出張所	1.3997	1.3267	0.58	6.557	763	81.979
3	花見川消防署	1.4953	1.4252	0.47	9.485	1918	187.282
4	宮崎出張所	1.5008	1.4434	0.44	8.579	2828	193.823
6	作新台出張所	1.4843	1.4411	0.39	8.901	2585	189.893
7	桜木出張所	1.5132	1.4428	0.42	8.557	2629	192.141
8	若葉消防署	1.4829	1.4508	0.41	9.006	2699	206.559
9	生浜出張所	1.4813	1.4226	0.42	8.968	2332	172.999
10	西千葉出張所	1.5309	1.4738	0.39	8.443	2952	208.436
11	泉出張所	1.4495	1.3983	0.47	8.790	1433	153.676
14	大宮出張所	1.4843	1.4226	0.40	8.503	2145	171.031
15	中央消防署	1.5147	1.4650	0.36	9.176	2880	215.954
16	殿台出張所	1.5363	1.4707	0.38	9.207	3145	229.718
17	都賀出張所	1.5089	1.4436	0.38	8.823	2448	188.659
18	土気出張所	1.3881	1.3344	0.51	5.959	975	76.727
19	美浜消防署	1.5163	1.4565	0.42	8.240	2616	201.200
20	畑出張所	1.5163	1.4317	0.39	7.638	2237	166.759
22	誉田出張所	1.4182	1.3766	0.55	7.670	1404	119.924
23	緑消防署	1.4459	1.4171	0.51	7.317	1369	136.039

※除外： 5_高浜出張所、12_蘇我出張所、13_打瀬出張所、21_幕張出張所、24_臨港出張所

7. まとめ

千葉県千葉市における道路網のフラクタル次元解析により、救急隊の出動記録を用いた救急搬送に基づく有効な医療圏域と道路網形態のフラクタル性との相関を分析することで、実空間におけるフラクタル次元解析が有効圏域を構築する際の可能性の検討を行った。

今後の方針として、本稿で得られた成果をもとに救急搬送に影響を及ぼすと考えられる道路幅員や道路の渋滞情報、人口密度などの要素について検討・分析を重ねる予定である。

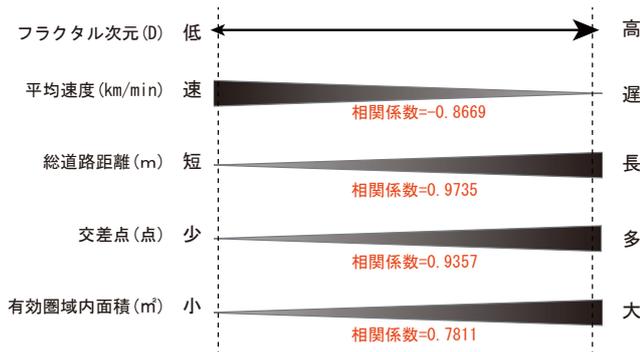


図7 有効圏域内におけるフラクタル次元Dの増減と各要素の増減の関係

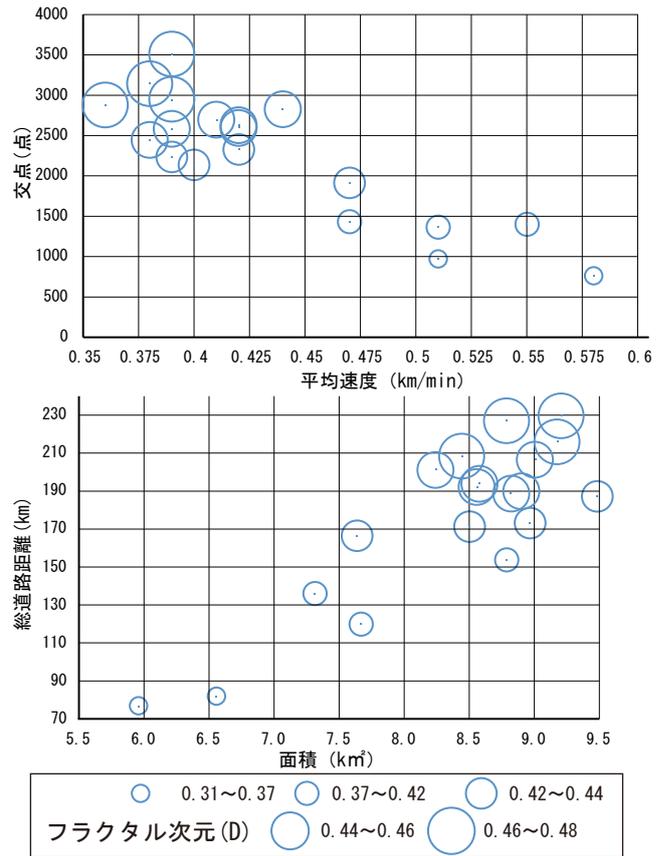


図8 各救急隊のフラクタル次元Dと各要素の相関関係

《謝辞》

本研究を進めるにあたり、調査に御協力、資料を提供いただいた千葉市消防局及び(財)救急振興財団の皆様各位に、深く感謝の意を表記して御礼申し上げます。なお本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C)「防災減災と連動した救急医療施設とドクターカー・ヘリとの連携による医療圏域の構築」(大内宏友、2014~2018年度、課題番号:26420622)の助成を受け、実施したものである。

《注釈》

- *1 フラクタル次元は、自己相似性を定量化した数値であり、相似性をもとにした測度で、位相次元と異なり、非整数値をとることが特徴である。
- *2 フラクタル解析システムは、(独)農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所が開発した解析ソフトであり、ボックスカウンティング法により、フラクタル次元を算出するものである。
- http://cse.naro.affrc.go.jp/sasaki/
- *3 ボックスカウンティング法は容量次元としてフラクタル次元を算出する方法である。容量次元の他に代表的なものとして、相似次元、測定次元、被覆次元などがある。
- *4 ArcGISは、米国カリフォルニア州Esri社の地理情報システムソフトウェア。
- *5 平均速度、出動時間等は、既発表論文[5]の田島らの「救急医療システムにおける地域空間情報をを用いた施設の適正配置について -GIS・GPSを用いた人口分布にもとづく圏域的指標の構築-」を元としている

《参考文献》

- [1] 水野 節子・掛井 秀一：「都市街路形態のフラクタル解析」日本建築学会計画系論文報告集 414巻号 pp 103-108, 1990-08-30
- [2] 岡田憲夫、田中成尚：「形態特性からみた道路網整備度の計量指標化に関する研究—フラクタル次元の適用」土木計画学研究・論文集 No.5 1987-11, pp.195-202
- [3] 牧 克敏, 黒川 洗, 石田東生：「微分フラクタル次元を用いた道路整備水準指標に関する研究」土木学会 第46回年次学術研究会, pp.434-435 (1991)
- [4] 高安秀樹:フラクタル, 朝倉書店(1986)
《既発表論文》
- [1] Ohuchi Hiroto, Yamada, S., Kuroiwa, T., Ouch S., and Matsubara, M. (2011) "Study on Changes in Ancient City Agoras using Fractal Analysis—Using Shaded Image to Describe the Formation of Agora in 300B.C., 150B.C., and 100A.D.—" Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.10, No.2, pp.359-366, 2011-11
- [2] Ohuchi Hiroto, Shintani, N., and Yamada, S. (2009) "Study on Landscape Recognition that Uses Image Processing Technology by Local Inhabitants in

Kamakura"Journal of Asian Architecture and Building Engineering Vol.8/No.1/pp.151-158

- [3] 蝶名林秀明、根来 宏典、大内 宏友：「フラクタル次元解析を用いた景観認知による可視化モデルの複雑性の定量化手法」日本建築学会技術報告集22巻号 pp.549-552, 2005-12-20
- [4] 小原崇宏・黒岩孝・松原三人・大内宏友：「道路形態の複雑性及び救急搬送への影響に関する実証的研究」ITS交通・電気鉄道合同研究会資料 pp.45-47, 2013.11
- [5] 大内宏友・高倉朋文・横塚雅宜：「救急医療システムを施設配置の関係性に関する実証的研究—地域における医療施設と救急施設との複合化の適正配置に関する研究—」日本建築学会論文報告集第466号, pp87-94, 1994.12
- [6] 木村弘・黒岩孝・大内宏友・松原三人：「救急医療システムにおけるドクターカーと救急医療施設との連携よりとらえた適正配置に関する実証的研究」環境情報科学論文集 26, pp.159-164, 2012.12
- [7] 田島誠・菊池秀和・大内宏友：「救急医療システムにおける地域空間情報をを用いた施設の適正配置について—GIS・GPSを用いた人口分布にもとづく圏域的指標の構築—」日本建築学会計画系論文集 第73巻第631号, pp1929-1937, 2008
- [8] 蝶名林秀明、根来 宏典、大内宏友：「フラクタル次元解析を用いた景観認知による可視化モデルの複雑性の定量化手法」日本建築学会技術報告集 第22号, pp549-552, 2005.12
- [9] 黒岩 孝、宮本和樹、大内宏友、松原三人「3次元都市空間における街区モデルのフラクタル性に関する研究」環境情報科学論文集, 第16号, pp329-334, 2002. 11
- [10] 木村敏弘、黒岩 孝、坂口浩一、松原三人、大内宏友、「3次元都市空間における街区のフラクタル性と環境認知との相関性について—江東区木場の連続した街区における分析・考察—」環境情報科学論文集, 第17号, pp83-88, 2003. 11
- [11] 黒岩孝、佐藤敬太郎、大内宏友、松原三人「航空写真のフラクタル解析による市街地の形態分類及び変化領域の抽出」環境情報科学論文集, 第19号, pp71-76, 2005.11
- [12] Ohuchi Hiroto, Kimura Toshihiro, Shimazaki Sho, Ohdaira Koji, Kanai Setsuko (2014) "Effective Sphere and Setting of Road Network Patterns by Fractal Analysis Ambulance Movement" IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2014)

- *1 日本大学大学院生産工学研究科 博士前期課程
- *2 株式会社梓設計 修士(工学)
- *3 日本大学生産工学部 教授・工博