

道路形態のフラクタル次元と救急搬送に基づく実態圏域との 関連に関する実証的研究

○田邊 哲^{*1} 黒岩 孝^{*2}
 大内 宏友^{*3}

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^{注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、都市を特徴づける因子の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。「平成26年度版 救急・救助の現況」^{注2)}によると、救急出動件数は年々増加傾向にあり、これに伴う救急車両の事件・事故・災害等の発生覚知から現場到着及び病院収容までの時間の遅れが顕著である。

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^{注3)}を用いることにより行う。生命を守る尺度として地域における救急医療システムのより早い治療開始時間に着目し、道路網形態のフラクタル次元が救急搬送に基づく有効な実態圏域との関係性により、道路網形態のフラクタル次元が救急医療を評価基準としていかなる意味を持つかを検証する。

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を行うことでフラクタル次元が高いほうが面的な広がりを持った幾何学的に複雑な形態になることを明らかにし、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ことを明示している。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と密度の違いを見ることができると示し、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。本稿はこれらの成果の延

長上にあるといえる。

以上のことから本稿では、救急医療施設の適正配置を検討する際の分析対象領域における地図の縮尺と形状（同心円・方形等）の相違がフラクタル次元に与える影響を把握し、これらと実態圏域との関係性を整理することにより、分析における地図上の解析範囲とその形状・縮尺の妥当性を検証し、道路網形態のフラクタル次元と救急搬送との関連の基礎的な指標の提示を目的とする。

2. 研究対象地域

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船橋市・千葉市を対象地域とする（図1）。船橋市は救急車両だけでなく、ドクターカーシステムを採用している。

千葉市消防局、船橋市消防局の協力により得られた救急出動に関する記録^{*5)}による、27087件（船橋市）、5649件（千葉市）の事例を有効資料として取り扱っている。

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。

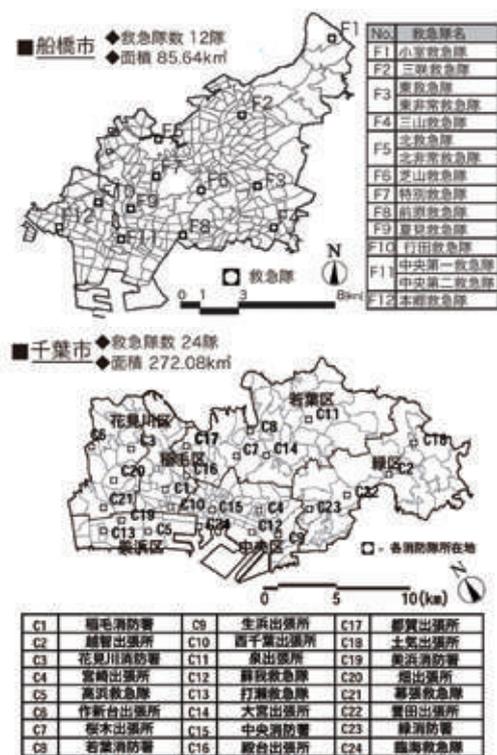


図1 研究対象地域

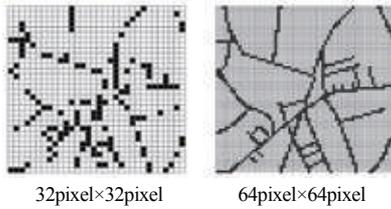


図2 ボックスカウンティング法 (例)

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。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、値が大きいくほど、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。

4. 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、救急医療における道路形態の影響の分析を行うために本稿ではArcGIS*6)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、船橋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な実態圏域のフラクタル次元解析を以下のように行う(図3)。

- ①船橋市内の消防署(全12救急隊)を数値地図上にプロットする。1/2500における道路幅が3[m]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。
- 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実態圏域として算出し、可視化する。
- ③道路区画と可視化した実態圏域を4分割する。
- ④4分割した実態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し、救急搬送に影響を及ぼす要素との相関係数*7)を算出する。ここでは、解析範囲として地図の縮尺(一律・相違)と形状(同心円・方形)4つの異なる解析対象のフラクタル次元解析により、道路網形態の多層構造の有無を確認し、地図上の解析範囲とその形状・縮尺の妥当性を検証する。各救急隊で一

ArcGIS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、船橋市の道路網ネットワークデータを作成する
道路網ネットワークデータ
・道路幅が3m以上の真幅道路を抽出
・道路情報として線分の長さ、速度、時間の入力
・道路の交差点を入力

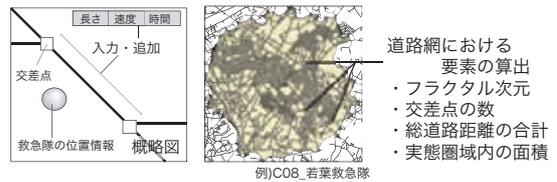


図3 フラクタル次元解析による救急搬送に基づく実態圏域の設定手法の手順

律の領域・縮尺の解析範囲(図4)を救急隊ごとに実空間の搬送領域(同心円状)の実態圏域の全体が入る、最も広い範囲である方形を用いる場合について、船橋市ではF5_北救急隊2.184×2.184[km]の範囲を用い、千葉市においては14_大宮救急隊4.112×4.112[km]の方形を用いる。各解析範囲の道路網の領域と縮尺を一律とした方形区域と実態圏域を解析する。

また、解析画像内に海水域及び、広域における都市公園施設が入る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道路網が欠損し、分析結果に影響を及ぼすため本論では除外した。

5. まとめ

千葉県船橋市・千葉市を研究対象地域とした救急搬送における有効な実態圏域における道路網形態とフラクタル次元との関係性について以下の通りまとめる。

5.1. 船橋市の道路区画及び実態圏域とそれらをそれぞれ4分割した際のフラクタル次元の比較(表1)

それぞれの研究対象地域のフラクタル次元とそれらを4分割したフラクタル次元は、自己相似性の観点から考えると、同じ値をとることが望ましいといえる。F1_室救急隊の道路区画のフラクタル次元に注目すると(図5)、4分割したうちの②③④はほぼ近似値をとっているが、①については他の3つの平均値と比較すると0.1030の差異が生じている。このように、他の救急隊の実態圏域及び道路区画においても、フラクタル次元におよそ0.1の差異が生じていることがわかる。我々の既往学術論文で明らかになっているフラクタル次元と平均速度・総道路

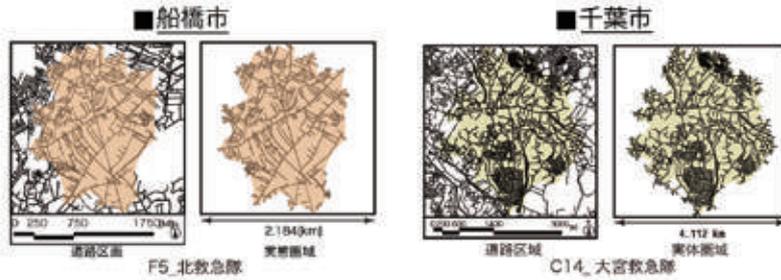


図4 各救急隊の同一の解析範囲での実態圏域及び圏域内の道路の抽出

表1 各救急隊の道路区画及び実態圏域のフラクタル次元と被度 (船橋市)

NO	救急隊名	実態圏域		道路区画		NO	救急隊名	実態圏域		道路区画			
		フラクタル次元	被度 (%)	フラクタル次元	被度 (%)			フラクタル次元	被度 (%)	フラクタル次元	被度 (%)		
F1	小室救急隊	1.3825	① 1.4162	2.5	1.4295	① 1.4444	4.6	1.3771	① 1.3380	1.2	1.4503	① 1.3659	2.9
			② 1.3270	1.3		② 1.3419	2.5		② 1.3268	1.6		② 1.3670	3.1
			③ 1.3528	1.3		③ 1.3411	2.1		③ 1.3663	1.7		③ 1.4290	4.2
			④ 1.2874	1.1		④ 1.3401	2.5		④ 1.3579	1.7		④ 1.3954	3.6
F2	美味救急隊	1.3823	① 1.3157	1.2	1.4743	① 1.4419	4.5	1.4158	① 1.4112	2.5	1.4812	① 1.4257	4.3
			② 1.3388	1.9		② 1.3744	3.1		② 1.3703	2.4		② 1.4246	4.2
			③ 1.2899	1.5		③ 1.3808	3.2		③ 1.3919	2.4		③ 1.4375	4.5
			④ 1.4187	2.5		④ 1.4540	4.8		④ 1.3542	2.0		④ 1.3992	3.6
F3	東救急隊	1.4261	① 1.4202	3.0	1.5090	① 1.4809	5.6	1.4137	① 1.3707	1.3	1.4716	① 1.3794	2.9
			② 1.3777	2.1		② 1.4323	4.3		② 1.3989	2.4		② 1.4409	4.6
			③ 1.4091	1.8		③ 1.4722	5.4		③ 1.4006	2.5		③ 1.4433	4.7
			④ 1.3562	1.9		④ 1.4035	3.7		④ 1.3447	1.5		④ 1.3823	3.3
F4	三山救急隊	1.4330	① 1.4173	2.9	1.4871	① 1.4482	4.8	1.4367	① 1.3835	2.3	1.4919	① 1.4421	4.6
			② 1.3784	1.7		② 1.3832	2.8		② 1.4111	2.4		② 1.4356	4.4
			③ 1.4224	2.2		③ 1.4498	4.6		③ 1.4049	1.9		③ 1.4267	3.4
			④ 1.3956	2.6		④ 1.4340	4.2		④ 1.4287	3.0		④ 1.4444	4.4
F5	北救急隊	1.3979	① 1.3841	2.4	1.4613	① 1.4597	4.6	1.4256	① 1.4044	2.6	1.4889	① 1.4472	4.7
			② 1.3772	2.0		② 1.4185	4.0		② 1.3772	2.3		② 1.4219	4.1
			③ 1.3496	1.8		③ 1.3959	3.6		③ 1.4002	2.2		③ 1.4425	4.6
			④ 1.2977	1.2		④ 1.3090	1.8		④ 1.3702	2.1		④ 1.4036	3.7
F6	芝山救急隊	1.3870	① 1.2985	0.9	1.4673	① 1.3603	3.0	※除外した救急隊: F10_行田救急隊					
			② 1.3896	2.7		② 1.4553	4.9						
			③ 1.3614	2.1		③ 1.4063	3.9						
			④ 1.3277	1.5		④ 1.3958	3.5						

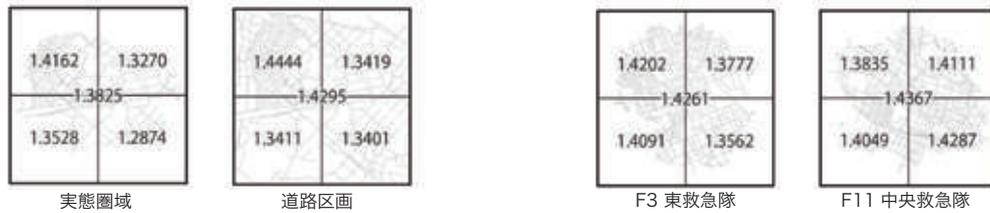


図5 F1小室救急隊におけるフラクタル次元

図6 4分割した際のフラクタル次元

表2 各救急隊の道路区画及び実態圏域のフラクタル次元と被度 (千葉市)

NO	救急隊名	道路区画		実態圏域		NO	救急隊名	道路区画		実態圏域			
		フラクタル次元	被度 (%)	フラクタル次元	被度 (%)			フラクタル次元	被度 (%)	フラクタル次元	被度 (%)		
C1	稲毛消防署	1.5427	① 1.4908	5.0	1.4722	① 1.4422	2.9	1.4495	① 1.3335	2.2	1.3983	① 1.3139	1.5
			② 1.4580	4.3		② 1.4338	3.4		② 1.3713	2.7		② 1.3474	1.9
			③ 1.4760	4.6		③ 1.4209	2.3		③ 1.3906	2.9		③ 1.3794	2.3
			④ 1.4907	5.1		④ 1.4653	3.8		④ 1.3628	2.6		④ 1.3493	1.7
C2	越智消防署	1.3997	① 1.3462	2.4	1.3267	① 1.3205	1.7	1.4843	① 1.3986	3.0	1.4226	① 1.3423	1.5
			② 1.2641	1.4		② 1.2422	0.8		② 1.4433	3.8		② 1.3839	2.3
			③ 1.3072	1.8		③ 1.3401	1.2		③ 1.4384	3.8		③ 1.3942	2.0
			④ 1.3673	2.5		④ 1.2851	1.2		④ 1.3701	2.5		④ 1.3664	2.0
C4	宮崎消防署	1.5008	① 1.4148	3.3	1.4434	① 1.3654	1.8	1.5363	① 1.4710	4.6	1.4707	① 1.4424	3.4
			② 1.4639	4.5		② 1.4448	3.9		② 1.4745	4.6		② 1.4296	2.9
			③ 1.4584	4.2		③ 1.4466	3.7		③ 1.4954	5.2		③ 1.4548	3.3
			④ 1.3702	2.7		④ 1.3475	2.1		④ 1.4488	4.1		④ 1.4288	2.9
C6	作新台出張所	1.4843	① 1.4680	3.6	1.4411	① 1.4515	3.2	1.5089	① 1.3854	2.7	1.4436	① 1.3841	1.7
			② 1.4561	4.1		② 1.4413	3.5		② 1.4350	3.5		② 1.3950	1.4
			③ 1.4185	3.6		③ 1.3967	2.4		③ 1.4399	3.7		③ 1.4174	2.6
			④ 1.3521	2.5		④ 1.3190	1.6		④ 1.4759	4.5		④ 1.4542	3.0
C7	桜木出張所	1.5132	① 1.4359	3.7	1.4428	① 1.3920	2.0	1.3881	① 1.2525	1.2	1.3344	① 1.2483	0.4
			② 1.4609	4.2		② 1.4382	3.1		② 1.2465	1.2		② 1.2642	0.6
			③ 1.4535	4.0		③ 1.4094	2.3		③ 1.4319	3.7		③ 1.4807	1.5
			④ 1.3711	2.7		④ 1.3439	1.8		④ 1.3061	1.6		④ 1.3432	1.3
C8	若葉消防署	1.4829	① 1.4436	4.0	1.4508	① 1.4378	3.4	1.5163	① 1.4050	3.3	1.4317	① 1.3526	1.9
			② 1.3961	3.0		② 1.4016	2.5		② 1.3660	2.7		② 1.3196	1.4
			③ 1.4204	3.6		③ 1.4023	2.7		③ 1.4928	4.8		③ 1.4492	3.4
			④ 1.4281	3.6		④ 1.4349	3.1		④ 1.4817	4.9		④ 1.4107	2.7
C9	生浜消防署	1.4813	① 1.4308	3.4	1.4226	① 1.3927	2.4	1.4459	① 1.3562	2.3	1.4171	① 1.3486	1.9
			② 1.3889	3.0		② 1.3563	2.0		② 1.2804	1.5		② 1.3012	0.9
			③ 1.4440	4.0		③ 1.4093	2.9		③ 1.3408	2.1		③ 1.3129	1.2
			④ 1.3972	3.1		④ 1.3806	2.3		④ 1.3653	2.6		④ 1.3726	1.7
C10	西千葉出張所	1.5309	① 1.4866	5.0	1.4738	① 1.4585	4.0	1.4459	① 1.3380	2.6	1.4171	① 1.3868	2.0
			② 1.4669	4.2		② 1.3762	1.8		② 1.3268	2.1		② 1.355	1.8
			③ 1.3902	2.5		③ 1.3982	2.0		③ 1.3663	2.5		③ 1.3793	1.7
			④ 1.4849	5.0		④ 1.4586	4.1		④ 1.3579	3.2		④ 1.4017	2.7

※除外した救急隊: C5_高浜救急隊, C12_蘇我救急隊, C13_打瀬救急隊, C21_幕張救急隊, C24_臨海救急隊, F10_行田救急隊

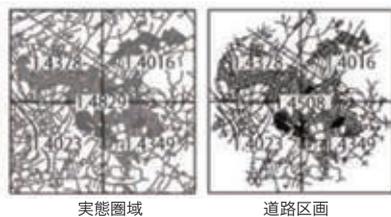


図7 C8若葉救急隊におけるフラクタル次元

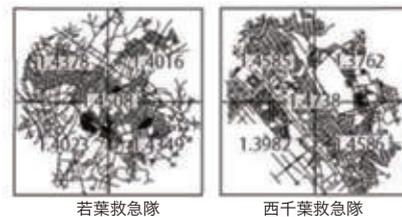


図8 4分割した際のフラクタル次元

距離・交差点数・実態圏域面積の増減の関係^[7](図9)を踏まえると、フラクタル次元が高くなるほど搬送にかかる速度はより遅くなる傾向にあることがわかる。

5.2. 船橋市の実態圏域を4分割した際のフラクタル次元とそれぞれの被度についての考察

フラクタル次元解析は前述にもあるように、実態圏域及び道路区画に対し行っており、すなわちこの場合の被度は、4分割した各対象面積のうちどの程度道路が整備されているかを表した数値である。実態圏域の被度において特に高い数値を示したF3_東救急隊とF1 1_中央救急隊に注目する(図6)。F3_東救急隊では4分割した①で被度3.0%、フラクタル次元は1.4202を示している。ほかの②③④と比較しても被度、フラクタル次元ともに数値は高い。また、F1 1_中央救急隊では4分割したうちの④で被度3.0%、フラクタル次元は1.4287を示している。

5.3. 千葉市の道路区画及び実態圏域と、それらを4分割したフラクタル次元の比較分析(表2)

千葉県千葉市を研究対象地域とした救急搬送における有効な実態圏域における道路網形態とフラクタル次元との関係性について以下にまとめる。

それぞれの研究対象地域のそれらを4分割したフラクタル次元は、自己相似性の観点から考えると、同じであることが望ましいといえる。C8_若葉消防署の実態圏域のフラクタル次元に注目すると(図7)、①④、②③はそれぞれ近似値をとっているが、それぞれの平均値で比べると0.0344の誤差が生じている。このように、ほかの救急隊の道路区画及び実態圏域においても、フラクタル次元におよそ0.04の差異が生じていることがわかる。我々既往学術論文で明らかになっているフラクタル次元と平均速度・総道路距離・交差点数・実態圏域面積の増減の関係^[7](図9)を踏まえると、フラクタル次元が高くなるほど搬送にかかる速度はより遅くなる傾向にあることがわかる。

5.4. 千葉市の実態圏域を4分割した際のフラクタル次元とそれぞれの被度についての考察

実態圏域の被度において特に高い数値を示したC8_若葉消防署とC10_西千葉出張所に注目する(図8)。C8_若葉消防署では4分割した①で被度は3.4%、フラクタル次元は1.4378を示している。他の②③④と比較しても被度、フラクタル次元ともに数値は高い。また、C10_西千葉出張所では4分割した④で被度は4.1%、フラクタル次元は1.4586を示している。同じように他の①②③と比較しても被度、フラクタル次元ともに数値は高い。

このように、被度とフラクタル次元を比較すると、被度が高いほどフラクタル次元も高い傾向があることと言える。すなわち、フラクタル次元が高いほど実態圏域内の道路網が面的に広がっている傾向にあることが指摘できる。フラクタル次元が高ければ高いほど、搬送にかかる速度は遅くなる傾向にあると前述したが、逆に救急医療における有効な搬送範囲である実態圏域は広がると言える(図10)。

ただし今回の被度において道路幅や交通等の情報は含まれていないため、どのようにすればより実態圏域を広げることができるかの一つの指標を作るためには、今後これらを踏まえた解析及び分析が必要である。

以上により、救急医療施設の適正配置の検討をする際における有効な基礎資料の作成をすることができた。

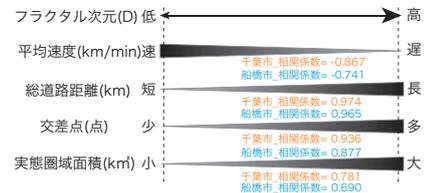


図9 実態圏域におけるフラクタル次元Dと各要素の増減関係

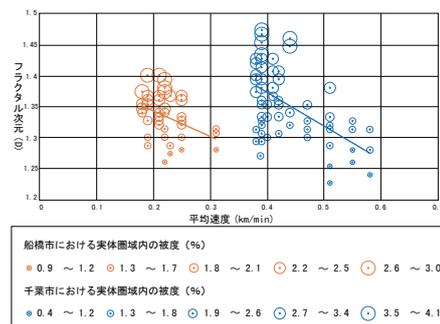


図10 フラクタル次元による実態圏域内被度と平均速度の相関関係

《謝辞》

本研究を進めるにあたり、調査に御協力、資料を提供していただいた千葉市消防局、船橋市消防局及び助救急振興財団の皆様各位に、深く感謝の意を表し記して御礼申し上げます。

《注釈》

- 1) フラクタル次元: 自己相似性を定量化した数値であり、相似性を基にした測度で、位相次元と異なり、非整数値をとることが特徴である。
- 2) 平成26年度版救急・救助の現況: 総務省消防庁 2014.12
- 3) フラクタル解析システム: (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/
- 4) ボックスカウンティング法: 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、相次元、測定次元、被覆次元などがある。
- 5) 救急出動に関する記録: 千葉市、船橋市消防局の協力により、フラクタル次元に関する記録による全32736件(千葉市: 5649件)(船橋市: 27087件)の事例を有効資料として取り扱っている。記録には出動隊名、搬送者数、出動場所、出動年月日、覚知時分、出動時分、現場到着時分、接触時分、現場出発時分、ドクターカーヘリとの連携活動等が記載されている。

《既発表論文》

- [1] OHUCHI HIROTOMO, YAMADA, S., KUROIWA, T., OHUCHI S., AND MATSUBARA, M.(2011) "STUDY ON CHANGES IN ANCIENT CITY AGORAS SING 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] 島崎翔・大平晃司・木村敏浩・大内宏友:「道路網形態のフラクタル次元と救急搬送に基づく実態圏域との相関」日本建築学会技術報告集第21巻第49号 PP.1301-1306, 2015
- [3] OHUCHI HIROTOMO, 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)
- [4] 鎌名林秀明・根来宏典・大内宏友:「フラクタル次元解析を用いた量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巻号 PP.549-552,2005,12
- [5] 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
- [6] 大内宏友・高倉朋文・横塚雅宜:「救急医療システムと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, PP.87-94,1994.12
- [7] 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
- [8] 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 631号, PP.1929-1937,2008

《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, 黒川流, 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)

*1 日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻博士前期課程

*2 日本大学 生産工学部 電気電子工学科 教授・工博

*3 日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻 教授・工博