高分解能衛星データを用いた崩壊斜面のフラクタル評価

Evaluation of Fractal for Slope Failure Using High Resolution Satellite Data

島 重章 Shigenori SHIMA (広島工業大学工学部) 中川暢人 Masato NAKAGAWA (広島工業大学大学院)

自然界に存在するものはフラクタル性を有しており、フラクタル次元を持っていると考えられている. 現在多発している土石流災害においても例外ではなく、そのフラクタル次元は複雑性を特徴づける指標と なり、防災工事などの建設および改修工事の一つの評価方法になると考えられる.また近年、衛星データの 普及および高性能化が進んできている.ここでは高分解能衛星 IKONOS データを用いて、フラクタル性評価 を行い、既存の土砂災害地への適用を試み、広島地域における地盤災害について、検討したものである.

キーワード:リモートセンシング,斜面崩壊,	フラクタル理論(IGC : CO1, CO7)
-----------------------	----------	-----------------

1. はじめに

わが国は、平地が乏しく国土の三分の二が山地である. 山地部では急峻な地形を成し、不安定な地殻構造および火 山活動により形成された脆弱な地質や土質条件のところ が多く、加えて台風常襲地帯および地震多発地帯に位置す るため、自然災害を受けやすい.広島県の場合、花崗岩地 帯であって海岸線から急傾斜の山腹がつながり、平地が極 めて少ない.その山腹傾斜地では、花崗岩の土砂化と崩落 が自然の営みとして繰り返されている.また、崩落した土 砂は渓流に堆積し、豪雨の発生に際して土石流となって流 れ下る現象が各地に見られる.

これら自然災害の安定性評価は,現地調査により様々な 力学的性質を把握する必要があり,これらのデータを収集 することに時間を要するとともに,長年の技術者の経験に よって災害の危険性の判断が行われてきた.

自然界に存在するものはフラクタル性を有し、フラクタ ル次元を持っていると考えられる.フラクタルの概念は、 これまで物理化学や地球科学分野に適用されているが、応 用地質学や土木工学などへの技術的な応用は充分にされ ていない.

そこで本研究は, 平成11年6月29日に発生した広島豪 雨災害を対象として, 被災地である広島市安佐北区の亀山 地区, 久地地区, 飯室地区における土石流崩壊地形のフラ クタル性評価を行った. その結果をもとに, 渓流の複雑性 から発生する二次災害に対処できる指標を作成していく ことを目的とする.

2. フラクタル理論

フラクタルとは、マンデルブロー¹¹が提唱した理論であ り、自己相似性を持つ図形を意味する.彼は、今まで取り 扱えなかった複雑な図形の中に、フラクタルというひとつ の数学的捉え方を発見した.自己相似性を持つということ は、図形の一部分を拡大すれば同じような図形が見え、巨 視的に見ても微視的に見ても形が大して変わらないとい うことである.不規則な海岸線や山の起伏、雲の形などは フクタル性を持つといわれている.また、これ以外にもフ ラクタル性を持つ形や現象が次々と発見されている.

そこで,フラクタル性を有している自然現象を説明する には,フラクタル次元という新しい物理量を定義して,簡 単に定量化することが必要である²⁾.

ある k 次元の図形を a 倍に相似拡大すれば,量は a ^k倍 になる.しかし,フラクタル図形においては k が整数とは 限らない.このときの k をフラクタル次元と定義する.あ る図形が,全体の a 分の 1 になるようにするとき,各々の 部分が全体と統計的に相似であり,これらの個数が平均 b であるとき a ^k = b であるため,全体の構造のフラクタル 次元は, k = $\log_a b$ である.例えば,図-1 に示すコッホ 曲線では,3倍に相似拡大したときの量は4倍になる.す なわち,3^k=4 であることがいえる.これにより k を求め れば,

$$k = \log 4 / \log 3 \approx 1.26 \tag{1}$$

である. すなわち, コッホ曲線のフラクタル次元は, 1.26 ということになる. 一般に曲線の次元は, 1 次元と 2 次元 の間にあると考えられる³⁾.



図-1 コッホ曲線

- 101 -

フラクタル次元を求めるということを要約すれば,

- 与えられた構造の部分を拡大したものが全体と同じ ように見えるかどうかを確かめ、その構造がフラク タルかどうかを確認する.
- ② 何分の1のものが平均何個集まって全体を構成しているかを調べ、フラクタル次元を対数を使って求める.

以上の二つを調べれば、ある構造の複雑さを特徴づける ことになる.

3. 調查地域

対象とした調査地域は,広島市安佐北区の土砂崩壊現場 である.その中から解析位置は,亀山地区,久地地区およ び飯室地区である.2001年5月16日の調査地域全体の位 置図を図-2に示す.



図-2 調査地域全体 (IKONOS画像)

3.1 地域特性

今回の調査地域は、広島県西部の大半を占める冠山山地 の山麗部に位置しており、標高400~500mの中起伏山地お よび谷底平野に面したところである.付近の傾斜は山体中 腹部で30~35°程度であるが、山裾は5~10°の緩傾斜地 となっている.山体の基盤岩は広島花崗岩の粗粒花崗岩で あり、表層部は風化によって形成されたまさ土である.

3.2 災害状況

平成11年6月29日未明から降り始めた豪雨は,186箇 所のがけ崩れと139 渓流で土石流などが発生し,死者31 名,行方不明者1名,合計32名の人的被害を出した.そ の内訳として,4箇所のがけ崩れで死者11名,5渓流の土 石流で死者13名,氾濫などで死者7名,行方不明者1名 の人的被害をもたらした.

被害発生箇所は、サ日市市、広島市佐伯区、安佐南区、 安佐北区を中心とする広島市西部地域と呉市周辺に集中 していた.また今回の土石流災害では、土石に多量の流木 が含まれていたことも特徴的である⁴⁾. 4. フラクタル解析方法

4.1 高分解能衛星 I KONOS

人工衛星 IKONOS は、アメリカのスペースイメージング (Space Imaging) 社により 1999 年 4 月 27 日に打ち上げ られた衛星で、直径 1 mの小さな物体でも識別できる衛星 写真が撮影できる商用人工衛星の名称である⁵⁾. IKONOS の性能を表-1 に示す.

表-1	人	工衛	星	IKONOS	の性能
-----	---	----	---	--------	-----

センサータイプ	リニアアレイ
検知素子	CCD
素子数	13,816 個(パンクロマチック)
	3,454 個(マルチスペクトル)
波長域	パンクロマチック 0.45~0.90μm
	マルチスペクトル
	青 0.45~0.52 µ m/緑 0.52~0.60 µ m
	/赤 0.63~0.69μm/近赤外線 0.76
	\sim 0.90 μ m
地上分解能	パンクロマチック
	直下 0.82m, オフナディア 26 度 1.0m
	マルチスペクトル
	直下 3.30m, オフナディア 26 度 4.0m

4.2 ボックスカウンティング法

図形 x が一辺 d の正方形 N(d) 個で覆われた(図-3 で、d=1×1 画素(1格子), N(d)=10(網部分)) と する. ここである定数 k において、さまざまな大き さの一辺 d に対し正方形の個数 N(d) を測定したと ころ、N(d) と d^{-*}の間に比例関係

$$N(d) = \mu d^{-k} (\mu は正の定数)$$
(2)

があるとき,自然対数をとれば,

 $\log N(d) = -k \log d + \log \mu$ (3)

となり, log N (d) と log d の関係は直線の式を意 味している.したがって,一辺の長さ d とその正方 形の個数 N (d) を測定したとき, log N (d) と log d の間に傾き-k の直線関係があれば, k をフラクタ ル次元とする⁶.

形の複雑さを特徴づけるフラクタル次元は、k=1 以下:線より点に近い、k=1~2:線より複雑だが 面を覆い尽くすほどではない、2~3 面より複雑だが 立体ほどではないとされ,相関係数がr=-1 に近い ほどフラクタル構造を有していると定義される。

4.3 衛星データを用いた測定

衛星リモートセンシングデータは,正方形のメッシュデ

ータであるため、フラクタル次元を求めるボックスカウン ティングを行う際に、対象物を正方形で細分する必要がな いため、適用が可能である⁷.



図-3より,格子の一辺が1(画素)のとき線形は10個の 格子で覆われている.同様に一辺が2(画素)のときは3 個,4(画素)のときは1個である.ボックスの一辺dと そのときの格子の個数N(d)の自然対数をとり,両者の関 係を示したものが図-4である.

直線的な配置であるため、この線形はフラクタル性を有 していることになる.そのフラクタル次元は直線の傾きか ら求められ、傾き及び切片は最小二乗法により求める.

5. フラクタル性評価

土石流線形のフラクタル次元は,崩壊流路幅をどのよう に評価するかによって数値に影響があるため.崩壊流路を 左岸・右岸・全体と区分し,3種類の次元を求めた.この 手法は右岸・左岸においては線分的な複雑性を検討するた めであり,全体については両岸の複雑性を含めた渓谷にお ける土石流の複雑性を検討するためであり,また流域面積, 崩壊土砂量との関連を検討するためである.

高分解能衛星 IKONOS より得られるマルチスペクトル赤, 緑,青の3種類を合成し、トゥルーカラー画像を作成する. その合成画像と地形図を重ね合せる場合,幾何補正をする 必要があるが,正射投影により得られた画像であり、小区 域を対象とするため,直接重ね合わせが可能である.

線形の求め方として図-5 に示す通り,土石流進行方向 に向い,源頭部から終着地点までの左河岸を左岸,右河岸 を右岸および左岸・右岸を含めた流路を全体とした.崩壊 形状は図-6から判読した.また図-7崩壊地位置図におい て,流域面積は稜線を黒で示し,土石流崩壊流路を赤線で 示している.



図-5 崩壊流路(ライン)の捉え方

5.1 亀山地区

崩壊は山腹中腹から始まり谷に沿い,蛇行を繰り返し, 住宅地に流出している.谷底部の平均勾配は約8°,幅3 ~15mで,崩壊距離は500mである⁸⁾.



図-6 亀山地区崩壊地 IKONOS 画像



/	d(画素)	N(d)	logd	logN(d)
1	1	883	0.000	6.783
左岸	2	438	0.693	6.082
	3	288	1.099	5.663
右岸	1	856	0.000	6.752
	2	418	0.693	6.035
	3	280	1.099	5.635
全体	1	7208	0.000	8.883
	2	1959	0.693	7.580
	2	1040	1 000	6047

表-2 亀山地区 フラクタル測定値



1.0 1.5 0.0 0.5 1.0 logd logd 左岸 右岸 y = -1.77 x + 8.86 フラクタル次元値 左岸 k=1.02 右岸 k=1.02 全体 k=1.77 1.0 1.5 logd

5.4

図-8 亀山地区 logd-logN(d)の関係

表-2, 図-8 から左岸,右岸をフラクタル次元で比較し てみると,k=1.02,k=1.02 と同値を示している.この 数値から左岸,右岸は同程度の複雑さで崩壊していること が判断できる.これは流路範囲が渓谷のため,限られた範 囲での蛇行となり,両岸が平行になったと考えられる.ま た1次元に近いフラクタル次元より,この両岸においては, 直線に近い線形を有していると言える.崩壊流路全体では k=1.77 と高い次元数を示している.次元数としては2次 元に近く,平面を埋めるような曲線であることを示してい る.全体の次元は両岸と異なり,流路全体が平面的な要素 を含むため,両岸より大きな値になる.ここでは渓谷の広 がり具合による形状,いわゆる流下する土石流の地域特性 をフラクタル次元で示していると考えられる.

この流路全体を上部,中部,下部に区分して評価したと ころ,k=1.61,k=1.73,k=1.84という結果を得た.こ れより上部から下部にかけて,複雑化していること示して いる⁸⁾.また崩壊形態に伴って,上部では崩壊面積が小さ く,下部に行くにつれて大きくなることを示している.

5.2 久地地区

0.0

9.4

8.4

6.4

5.4 L 0.0

(p)Ngc

0.5

0.5

全体

トゥルーカラー画像と重ね合わせた久地地区は,作成した図-9 に示すように尾根から谷に沿って大きく崩壊おり, 稜線を挟んで2方向に崩壊が生じている.このことから今 研究では,下流まで崩壊が生じている右側流路についてフ ラクタル性評価を行った.その結果,表-3,図-10に示す ように崩壊地全体のフラクタル次元がk=1.94と大きな 値を示した.これは崩壊面が面的に広がっているために表 れたものである.両岸においては左岸k=1.02,右岸k =0.99と直線的で単純な線形を示している.ここでは,右 岸がk<1.00となった.これはトゥルーカラー画像の彩度 や明度などの鮮明度,また周辺植生の繁殖状況から,河岸 線の細かな凹凸の判読に誤差が生じたと考えられる.

フラクタル次元を上部,中部,下部で判断するとk=1.90, k=1.95, k=1.95 となり,尾根から谷にかけての平面的 な広がりを持って,崩壊している.



図-9 久地地区崩壊地 位置図

表-3 久地地区 フラクタル測定値

	d (画素)	N(d)	logd	logN(d)
左岸	1	713	0.000	6.569
	2	351	0.693	5.861
	3	234	1.099	5.455
右岸	1	626	0.000	6.439
	2	312	0.693	5.743
	3	211	1.099	5.352
全体	1	18265	0.000	9.813
	2	4741	0.693	8.464
	3	2218	1 0 9 9	7 704



- 104 -

図-10 久地地区 logd-logN(d)の関係

5.3 飯室地区

飯室地区の崩壊は図-11 に示すように崩壊斜面,源頭部 付近の発生勾配は約45°であり,表土が深さ50~100cm, 幅10m,長さ40mにわたって崩壊したと推定され⁹⁾,下流 部の緩傾斜域に崩壊土砂の堆積がみられる.



表-4 飯室地区 フラクタル測定値

	d (画素)	N(d)	logd	logN(d)
	1	775	0.000	6.653
左岸	2	393	0.693	5.974
	3	262	1.099	5.568
	1	775	0.000	6.653
右岸	2	389	0.693	5.964
	3	269	1.099	5.595
全体	1	8838	0.000	9.087
	2	2445	0.693	7.802
	3	1242	1.099	7.124



表-4 および図-12 の結果より,フラクタル次元は左岸 k =0.99,右岸 k=0.97 であり,河岸線は複雑ではなく直線 的な形をしていると言える.一般に直線形状を示すフラク タル次元は k=1~2 の間であるとされている.しかし, 図-12 で示すように左岸および右岸では1より小さい値 が得られた.ここでも前述の久地地区と同様に,トゥルー カラー画像の彩度や明度などの鮮明度,また周辺植生の繁 殖状況から,河岸線の細かな凹凸の判読が影響し, k>1 になったと考えられる.全体を見ると k=1.79 と 2 次元に 近い平面的な値をとっており,渓谷における地域特性を示 して複雑化しているように思われる.

同流路について小区域の検討結果は、上部k=1.54、中部k=1.77、下部k=1.90 とフラクタル次元を得ており、前述の亀山地区と同様に、土石流は上部から下部にかけて拡幅し、複雑化していること示している.

6. 結果の比較

本研究では、広島市安佐北区の亀山地区、久地地区、飯 室地区においてフラクタル解析を行った.それぞれ個別に 行ったフラクタル次元値を比較してみる.

それぞれの地区の右岸・左岸・全体のフラクタル解析結 果を表-5 に示す.

地区		フラクタル次元	相関係数
	左岸	1.02	1.000
亀山	右岸	1.02	1.000
全体	1.77	0.998	
<u>左岸</u> 久地 右岸	1.02	1.000	
	久地	0.99	1.000
	全体	1.94	1.000
	左岸	0.99	1.000
飯室	右岸	0.97	1.000
	全体	1.79	1.000

表-5 各地のフラクタル次元と相関係数

6.1 地域の比較

図-13より,左岸・右岸のk=1に近い値に対して,全体のフラクタル次元が大きく現れている.これは,ボックスカウンティング法における個数 N(d)のとり方によるものである.左岸・右岸では河岸線のみの線形に対し,流路全体は渓谷における土石流流路幅の個数となるため,次元数に大きな違いが生じている.



図-13の崩壊地全体については、久地地区が若干大きな 値を示したが、亀山地区および飯室地区においては k =1.77, k=1.79 と近い値を示している. 久地地区におい てフラクタル次元が大きい理由としては、崩壊状態が尾根 から谷にかけて広い範囲で起きており、面的に大きく影響 しているためと考えられる. それに対して、亀山地区およ び飯室地区は線形状の崩壊を示し、類似したフラクタル次 元を示したものと考えられる.

6.2 フラクタル性評価結果の比較

本研究で取り上げた広島市安佐北区の亀山地区,飯室地 区において,「平成11年の広島県豪雨災害調査報告書」地 盤工学会発行に記載されている土石流災害の諸元値¹⁰⁾を もとにフラクタル解析結果を比較する.

平成 11 年広島県豪雨災害緊急調査報告書から調査対象 とした 9 渓流で発生した土石流の流出土砂量と流域面積 を表-6 に示す.また,崩壊土砂量と流域面積の関係を図 -14 に示す.

河法友	流域面積	崩壊土砂量
决而名	(km ²)	(m ³)
中倉川	0.561	15,100
大毛寺川左支川	0.069	3,200
安川左支川	0.046	2,200
猿滝川	0.503	6,100
古野川	0.873	21,100
堂ヶ原川支川	0.021	2,700
荒谷川	3.705	30,400
下ヶ迫川支川	0.195	5,400
屋代川	0.806	20,800

表-6 各渓流の流域面積と崩壊土砂量



図-14 崩壊土砂量と流域面積の関係

表-6と図-14から、流域面積が広くなるにつれて、崩壊 土砂量の増加が考えられる.

検討対象とした安佐北区の3地区において,崩壊土砂量 および流域面積についての計測値が得られていない.ゆえ に図-14 のから各々次のように推定し、亀山地区は S=21500m³, 久地地区はS=17500m³,飯室地区はS=21000m³ とした.この数値を利用して,崩壊土砂量とフラクタル次 元の関係を図-15 に流域面積とフラクタル次元の関係を 図-16 に示す.ここで用いた崩壊土砂量および流域面積 は、土石流の発生した崩壊域を対象としているため、フラ クタル次元は流路全体とする.



図-15より、土砂量とフラクタル次元は反比例の関係に あり、次元数が低下するに従って、土砂量が増加している. 同様に図-16の流域面積においても、次元が低下するに従って、面積が増加している. 地区別でみると、図-15お よび図-16に見られるように、久地地区のみ離れた位置に ある.これは、平面的な崩壊形態と線的な崩壊形態の違い、 および崩壊形状の大きさが影響しているものと考える.

過去の発表論文¹¹⁾で,安佐北区に影響をもたらしている素因として,傾斜を主とした要因が考えられた.そこで,既存資料をもとに 6.3 で検討する.

6.3 傾斜との比較

安佐北区の土石流発生要因として、大きな割合を占める と考えられる傾斜¹²⁾とフラクタル次元との比較を行う. ここで用いるフラクタル次元は、評価を行った地区につい ての流路全体であり、表-7 は各地区において上部、中部、 下部に区分した前回発表論文¹³⁾に使用したものである.

表-7 傾斜とフラクタル次元値

	and a subject to the second se	傾斜(°)	フラクタル次元
	上部	40.05	1.61
亀山	中部	37.30	1.73
	下部	11.75	1.84
	上部	35.36	1.90
久地	中部	25.05	1.95
	下部	22.66	1.95
	上部	31.25	1.59
飯室	中部	37.96	1.76
	下部	16.31	1.74

表-7 および図-17 を見ると, 緩傾斜から急傾斜にかけて, フラクタル次元が小さくなっており, フラクタル次元と傾 斜の関係では,反比例の傾向が表れた.

地区別にみると、全体的に緩傾斜の久地地区では、フラ クタル次元に大きな変化は見られなかった.これに対して 亀山、飯室地区は、傾斜の緩急によるフラクタル次元が現 れ、土石流の流路形態を示す結果となった.源頭部付近で は、規模が小さい土石流であるため、フラクタル次元が小 さいと考え、対照的に山麗下部付近になると、渓谷に沿っ て拡幅した土石流が、細かな蛇行を繰り返すため、フラク タル次元が大きくなったと考える.



7. おわりに

本研究では,平成11年6月29日に広島豪雨災害が発生 した亀山地区,久地地区,飯室地区におけるフラクタル性 評価を行い,その結果から得られた結論を以下に挙げる.

- (1) 正射投影図である IKONOS 画像で,小区域の画像 は直接的に地図データと重複が可能であり,崩壊 形態を直読することができる.
- (2) 高分解能衛星データは,地上分解能 1.0m を用い ており,フラクタル理論に利用するボックスカウ ンティング法の判読に有効である.
- (3) フラクタル次元は土石流の流出経路の線形を特 徴づける指標になると考えられる.
- (4) 研究地区のフラクタル性評価において,地域特性 を示す傾斜との関連性が見られた.
- (5) 急傾斜地より緩傾斜地の方がフラクタル次元が 大きくなることがわかった.

以上の結果から、土石流とフラクタル次元は関連性があると考えられる.

今後は、本論の成果を踏まえ、さらに多くの崩壊形状に 対してフラクタル性評価を行い、データを収集し、フラク タル次元と崩壊形態・崩壊要因との関係を明らかにすると ともに、崩壊と地域特性の関係を明らかにしていく必要が ある.そして研究結果をもとに、同地域における土石流の 2 次災害に対処できる指標を作成していくことを目標と する.

謝辞

本研究で用いたフラクタル次元解析は、長崎大学大学院 生産科学研究科の後藤研究室から多くの資料提供をいた だいた.また、人工衛星 IKONOS データは、日本スペース イメージング社および株式会社ハーディアの提供による ものである.ここに、感謝の意を示す.

参考文献

- 1) 高安秀樹:フラクタル, ㈱朝倉書店, pp. 5~7, 1998.
- 2) 岡部恒治:イミダス96, 集英社, pp.984, 1996.
- 3) 内田篤志,後藤恵之輔,川内透,前間英一郎:衛星リ モートセンシングデータを用いた河川線形と海岸線 形のフラクタル性評価,土木構造・材料論文集,第 13 号, pp. 141~148, 1997.
- 地盤工学会・調査部:平成11年の広島県豪雨災害調 査報告書,地盤工学会・中国支部, pp. 93~95, 2000.
- 5) 日本スペースイメージング: http://www.spaceimaging. co. jp.
- 6) 内田篤志:フラクタル解析とゆらぎ解析を用いた多様 な環境共存の状態評価に関する研究,長崎大学学位論 文,pp.18~19,2001.
- (後藤恵之輔,渡邉浩平,後藤健介:フラクタル次元に よる斜面安定性評価の試み,地盤と建設 Vol. 18, No. 1, pp. 47~52, 2000.
- 8) 前出 4), pp. 37~38, 2000.
- 9) 前出 4), pp. 39~40, 2000.
- 10) 前出 4), pp. 4~50, 2000.
- 11) 阿部充弘, 島重章, 下野宗彦:高分解能衛生を用いた 広島斜面災害の危険度評価に関する研究, 第55回研 究発表会 発表概要集, 土木学会中国支部, pp.221 ~222, 2003.
- 12) 前出11), pp. 221~222, 2003.
- 13)まさ土地帯の風化および降雨浸透特性と斜面災害に 関する研究委員会:まさ土地帯の風化および降雨浸透 特性と斜面災害に関する研究報告書,地盤工学会・中 国支部,pp.63~66,2003.