

フラクタル理論を用いた斜面崩壊形態の評価に関する研究

中 村 真*・島 重 章**

(平成14年9月9日受理)

Study on Evaluation of Slope Failure by Using Fractal Theory

Makoto NAKAMURA and Shigenori SHIMA

(Received Sep. 9, 2002)

Abstract

Everything which exists has fractal nature, and fractal dimension. It is thought that the fractal dimension becomes an index by which the alignment of river flow or debris flow is characterized, and becomes an evaluation method of slope failure.

There are two methods to analysis the fractal dimension, the first is the measuring method by dividers and the second is box counting method by the subdivision of the square. This paper proposed using the fractal analysis by using the satellite remote sensing data that is square mesh data from the previously mentioned methods.

The fractal nature evaluation was conducted for the area of Hiroshima under a heavy rain condition on June 29, 1999. This paper compares and examines the soil testing results and the slope failure result.

Key Words: slope failure, fractal dimension, remote sensing, Heavy rain calamity, slope stability analysis

1. は じ め に

最近、フラクタルという言葉をよく見かけるようになった。フラクタルとは、語源がラテン語の fractus で「破片、こわれた」という意味である。マンデルブローの提唱した理論による自己相似性を持つ図形のことを言う。このことから新しく定義したフラクタル次元により、複雑な図形を簡単に表すことができるようになった¹⁾²⁾。

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。そのフラクタル次元は河川や土石流の流出経路の線形を特徴づける指標となり、斜面崩壊形態の一つの評価方法になると考えられる³⁾。

フラクタル次元を求めるにはディバイダーで図る方法、正方形による細分で図るボックスカウンティング法などがある。ここでは、元々正方形のメッシュデータである衛星

リモートセンシングデータをフラクタル解析に用いることを提案した。その手法として、正方形による細分化測定方法と、衛星データを用いた測定方法が挙げられる⁴⁾。

そこで本研究では、平成11年6月29日に広島豪雨災害が発生した広島市佐伯区において、屋代地区、観音地区、上小深川地区におけるフラクタル性評価を行った。その結果から、それぞれの崩壊斜面の土質試験結果、斜面安定解析結果を比較・検討するものである。

2. フラクタル理論

フラクタルとは、マンデルブロー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、図形の一部を拡大すれば同じような図形が見え、巨視的

* 広島工業大学大学院工学研究科土木工学専攻

** 広島工業大学工学部建設工学科

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、雲の形などはフラ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と持つ形や現象が次々と発見されている⁵⁾。

マンデルブローがフラクタルの考え方をまとめる以前の1960年代のはじめころ、彼は経済学に関心があり、そこに自己相似性などのフラクタルのもとになるものを見つけた。それを海岸線の長さの問題などの幾何学的なもの結び付けていくことにより、フラクタルの概念に到達したという。医学、気象学、地形学などのさまざまな分野にも応用されるようになった。しかし、フラクタルをわれわれが考える複雑さと、より一致させるためには、自然界の複雑な構造がフラクタルを用いて解明できなければならない。そこで、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できるようになった⁶⁾。

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。全体の構造を分割し、分割されたそれぞれの差し渡しが全体のa分の1になるようにしたとき、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 $a = b$ 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、Fig. 2.1 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、

$$k = \log_3 4 \approx 1.26$$

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⁷⁾。フラクタル次元を求めるということを要約すれば、

①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

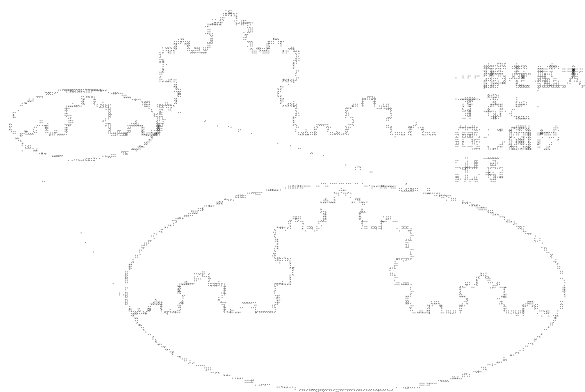


Fig. 2.1 コッホ曲線

かを確認する。

②差し渡しが何分の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⁸⁾。

3. 調査地域

3.1 調査地域

対象とした調査地域は、広島市佐伯区の土砂崩壊現場である。土試料を採取した位置は、屋代地区、観音地区および上小深川地区である。全体の位置図を Fig. 3.1 に示す。

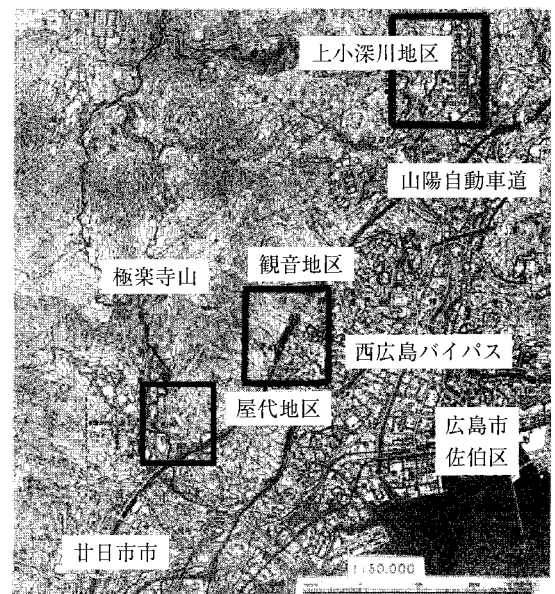


Fig. 3.1 調査地域全体

3.2 現地の地形地質状況

(1) 地形

対象とした佐伯区屋代地区、観音地区、上小深川地区は瀬戸内海に面しており、この地形は中生代白亜紀の造山活動により形成された地域である。この地域の隆起準平化した山体は、侵食堆積を繰り返して現在の地形となり、風化したマサ土、段丘堆積物、崩積堆積物などの地層を形成している。

(2) 地質

この地域の地質は、白亜紀後期の広島花崗岩類を母体とする山体、および第四期の堆積物からなる。広島花崗岩類は、黒雲母花崗岩および角閃岩花崗岩を主とし、第四期は、主に平地部に分布している沖積層のほか、山間部には極楽寺礫層、段丘堆積物、崩壊堆積物から成る。この地域の山地部は、地盤特性としての深層風化を伴い、表層は風化残積土および風化崩積土であるマサ土によって覆われている。

(3) 土地利用

広島市は、太田川、安川、吉山川、八幡川、伏谷川、可

愛川、御手洗川およびその支流の流域の低平地域に水田を主とする農業が行われている。また、林地は、大きく分けて南東部の大半を占める針葉樹地域と、北西部の一隅を占める針葉樹林地帯、およびその中間にある移行帯の3地域に区分することができる。今回調査地としてあげた屋代川地区、観音地区、上小深川地区は主として針葉樹地域となっている。

(4) 水系

広島市の水系に着目すると、大きく2つの流域に分けて考えることができる。一つは瀬戸内海側へ面した斜面に発達した五日市低地を形成する八幡川水系、廿日市低地を形成する可愛川・御手洗川水系である。もう一つは太田川の中・上流部の水系で、比較的大きな谷をつくりながら北流する河床勾配のゆるい水系である。今回調査地としてあげた屋代川地区は21本、観音地区は17本、上小深川地区は26本の水系から成る。

(5) 傾斜

広島市は、陸地が全体の約8割を占めている。そのうち、山地と低地が広い面積を占め、丘陵や台地に相当するものはみられない。

山地、低地の分布を概括的に見ると、広島市東部に太田川が作る傾斜3°未満の低地が広がり、中～西部にかけては、中南部の八幡川下流の低地を除き山地が広がっている。

陸地全体の約7割を占める山地は、西に行くにしたがい高度と起伏を増し、それに応じて急傾斜の地域が広がっている。山地のうち傾斜30°未満の傾斜分布をみると、山塊伸長方向の北東-南西の地形配列に沿って伸びる傾向がみられる。また、低地の分布にも類似の傾向がみられる。ただ、広島市中南西部の極楽寺山やのが高原の山塊では、その方向性はあまり明瞭ではない。

今回調査地としてあげた屋代川地区は15以上20°未満、観音地区は20以上30°未満、上小深川地区は8以上15°未満の傾斜を成している。

4. 土質試験および安定解析方法

4.1 土質試験方法

(1) 物理的性質試験

- ・ マサ土の物性試験 JIS A 1202
- ・ 粒度試験 JIS A 1204

(2) 化学的性質試験

- ・ pH 試験 JGS 0211
- ・ 強熱減量試験 JIS A 1226

(3) 力学的性質試験

- ・ 透水試験 JIS A 1218
- ・ 突き固めによる土の締固め試験 JIS A 1210
- ・ 一面せん断試験 JGS 0561

・ 三軸圧縮試験

4.2 安定解析の方法

すべり面の安全率は、式(4.1)に示す⁹⁾。

$$F_s = \frac{\text{すべり面に抵抗するモーメント}}{\text{すべりを起こすモーメント}} = \frac{R \sum (W_i \cdot \cos \beta_i \cdot \tan \phi_i + c_i \cdot l_i)}{R \sum (W_i \sin \beta_i)} \quad \dots (4.1)$$

分子、分母のRを消去すると

$$F_s = \frac{\sum (W_i \cdot \cos \beta_i \cdot \tan \phi_i + c_i \cdot l_i)}{\sum (W_i \sin \beta_i)} \quad \dots (4.2)$$

簡便分割法は、Fig. 4.1 (a) のすべり面上のブロックを多くの細長いスライスに分割して、Fig. 4.1 (b) に示すように、i 番目のスライスで釣り合いを考え、式(4.2)を用いる。

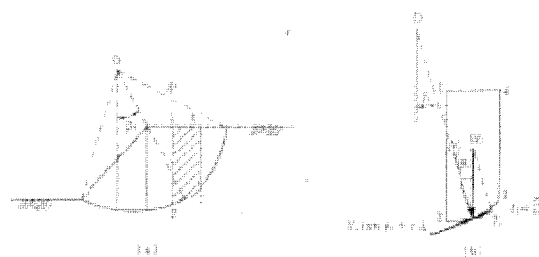


Fig. 4.1 分割方法と力の釣り合い

ここで W_i : i 番目のスライスの奥行き 1 mあたりの土の重量 (tf/m)

T_i : W_i のすべり面に平行な分力 $W_i \sin \beta_i$ (tf/m)

N_i : W_i のすべり面に垂直な分力 $W_i \cos \beta_i$ (tf/m)

R : すべり面の半径 (m)

l_i : スライスの弧の長さ (m)

ϕ_i : 弧の部分の土の内部摩擦角 (°)

c_i : 弧の部分の土の粘着力 (tf/m²)

4.3 フラクタル解析の概要

4.3.1 正方形による細分化測定

図形 x が一辺 d の正方形 $N(d)$ 個で覆われたとする。ここで定数 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^{-k} の間に比例関係

$$N(d) = \mu d^{-k} \quad (\mu \text{ は正の定数})$$

があるとき、自然対数をとれば、

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

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。

4.3.2 衛星データを正方形用いた測定

衛星リモートセンシングデータとして、IKONOS データを用いる。この衛星データは地上の大きさが $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ の正方形が 1 画素になっている。そこで、2 画素 \times 2 画素、3 画素 \times 3 画素と正方形の一辺をデータが読める範囲まで変えていき、そのとき図形 x がそれぞれがその個数 $N(d)$ 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。

5. 土質試験および安定解析結果

5.1 土質試験結果

Table 5.1 に物性試験結果を示す。調査地 6 箇所全ての土が $\rho_s = 2.63 \sim 2.67 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ を示しており、この 6 箇所の土は広島型風化花崗岩土（マサ土）である¹⁰⁾。

Table 5.1 物性試験結果

調査地	含水比 ω (%)	密度 ρ_s (g/cm ³)	湿潤密度 ρ_i (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比較 e
屋代川上流	10.10	2.677	1.785	1.621	0.653
屋代川下流	11.80	2.654	1.777	1.589	0.669
観音左岸	11.60	2.632	1.982	1.776	0.482
観音右岸	8.04	2.632	1.320	1.222	1.134
上小深川上流	12.64	2.657	1.697	1.506	0.764
上小深川下流	15.46	2.636	1.755	1.520	0.734

5.2 斜面安定解析結果

斜面の安定解析に用いたデータは、三軸圧縮試験によって得られた粘着力 C (kN/m²) と内部摩擦角 ϕ (°) を、また突き固めによる土の締固め試験結果から得られた湿潤密度 (g/cm³) を用いた。

安定解析の方法は、簡便分割法により最小安全率を求める。解析条件は、一定条件下での安定解析を行ったものと崩壊斜面に沿った安定解析を行った。

降雨を誘因とする崩壊にいたる斜面は、土中の含水量の増加および、飽和度の増加に伴い間隙水圧の上昇を招き、突発的な移動現象を発生させる。ここでは土中含水比の増加をシミュレーションした場合の安全率を検討した¹¹⁾。安定解析は、斜面の形状に生じた崩壊を一定条件下と仮定し、想定可能なすべり面の設定による安定解析を行った。また実際に発生した斜面崩壊のすべり面形状を崩壊斜面に沿った実測形状から安全率を求めた。崩壊に至る斜面の、含水比を 10, 15, 20, 25 (%) と変化させた場合の安定解析を行った。調査箇所の含水比と安全率の関係について、一定条件下の安定解析結果を Fig. 5.1 に、崩壊斜面に沿っ

た安定解析結果を Fig. 5.2 に示す。

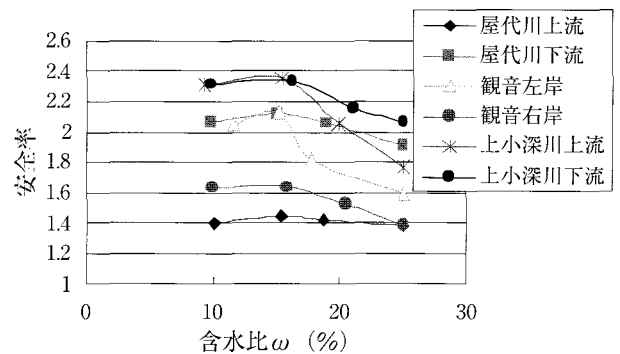


Fig. 5.1 一定条件下の安定解析結果

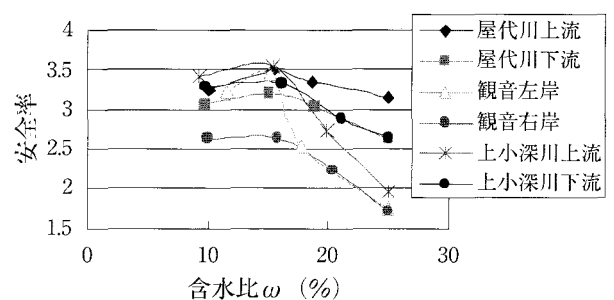


Fig. 5.2 崩壊斜面に沿った安定解析結果

6. フラクタル解析結果

フラクタル解析の対象としては、屋代地区、観音地区、上小深川地区の衛星データを用いた。ここに用いた衛星データは、IKONOS 衛星データ (2001年 5月16日観測) である。この衛星データは、1 画素が 1 m を示し、高分解能衛星データを提供する。この画像から得られる現地情報を基に、1 画素 \times 1 画素から 3 画素 \times 3 画素まで (正方形の一辺が 1 m ~ 3 m) 測定した。

測定は、屋代地区、観音地区、上小深川地区それぞれ上部、中部、下部の三箇所を対象とした。

屋代地区の IKONOS データを Fig. 6.1 に示す。図中に対象とした上部、中部、下部の三箇所を示す。例として、屋代地区の下部の拡大図を Fig. 6.2 に示す。

屋代地区の測定結果を Table 6.1 に、 $\log d - \log N(d)$ の関係図を Fig. 6.3 ~ Fig. 6.5 に示す。

Fig. 6.3 ~ Fig. 6.5 より、屋代地区のフラクタル次元は、上部が 1.78、中部が 1.78、下部が 1.83 という結果を得た。

観音地区の IKONOS データを Fig. 6.6 に示す。

観音地区の測定結果を Table 6.2 に、 $\log d - \log N(d)$ の関係図を Fig. 6.7 ~ Fig. 6.9 に示す。

Fig. 6.7 ~ Fig. 6.9 より、観音地区のフラクタル次元は、上部が 1.66、中部が 1.80、下部が 1.68 という結果を得た。

上小深川地区の IKONOS データを Fig. 6.10 に示す。

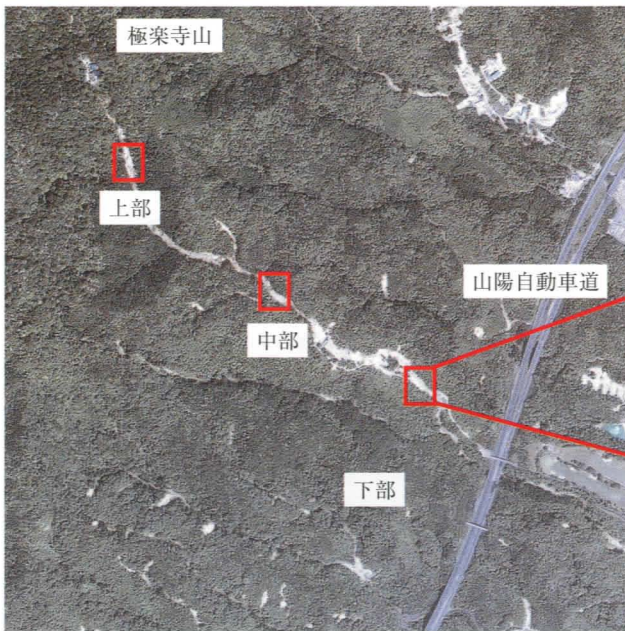


Fig. 6.1 屋代地区全体図 (1500×1500)

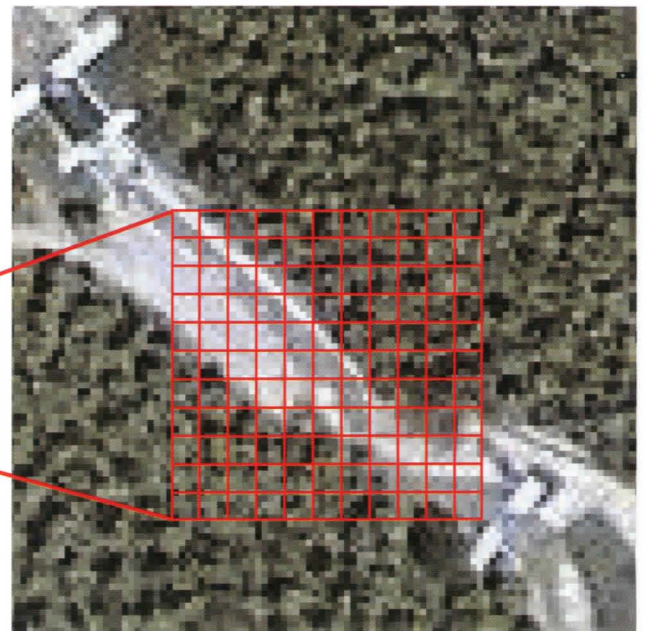


Fig. 6.2 屋代地区下部拡大図 (100×100)

Table 6.1 屋代地区の測定結果

	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
上部	1	1238	0.000	7.121
	2	334	0.693	5.811
	3	178	1.099	5.182
中部	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
	1	1348	0.000	7.206
	2	384	0.693	5.951
3	191	1.099	5.252	
下部	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
	1	1206	0.000	7.095
	2	345	0.693	5.844
3	161	1.099	5.081	

上小深川地区の測定結果を Table 6.3 に、logd-logN (d) の関係図を Fig. 6.11~Fig. 6.13 に示す。

上小深川地区のフラクタル次元は、Fig. 6.11~Fig. 6.13 より、上部が1.81、中部が1.89、下部が1.70という結果を得た。

以上に挙げた三箇所の測定結果を比較すると、フラクタル次元は屋代地区、上小深川地区に比べ、観音地区が低い値を示している。これは、観音地区が屋代地区、上小深川地区に比べて、崩壊範囲が狭かったためではないかと考えられる。

これら三箇所の計9個の測定結果すべての logd-logN (d) 関係は、ほぼ直線的にプロットできたため、フラクタル性を有していることが認められる。このことより、フラクタル次元は河川や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、斜面崩壊形態の一つの評価方法になると考えられる。

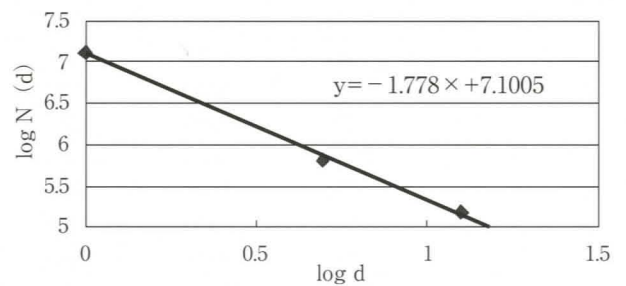


Fig. 6.3 屋代地区上部の logd-logN (d)

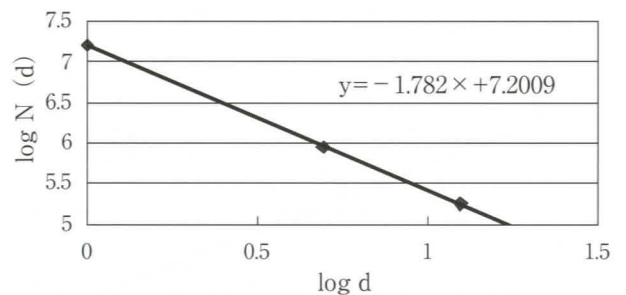


Fig. 6.4 屋代地区中部の logd-logN (d)

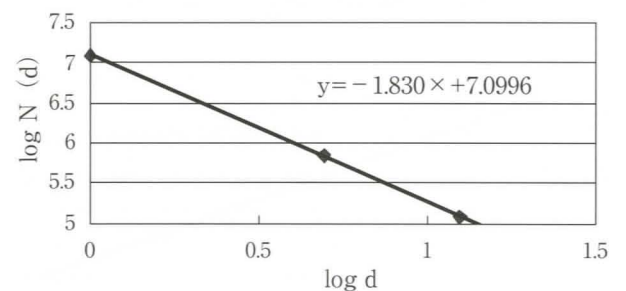


Fig. 6.5 屋代地区下部の logd-logN (d)



Fig. 6.6 観音地区全体図 (400×400)

Table. 6.2 観音地区の測定結果

	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
上部	1	460	0.000	6.131
	2	140	0.693	4.942
	3	75	1.099	4.317
中部	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
	1	764	0.000	6.639
	2	217	0.693	5.380
3	106	1.099	4.663	
下部	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
	1	457	0.000	6.125
	2	143	0.693	4.963
3	72	1.099	4.277	

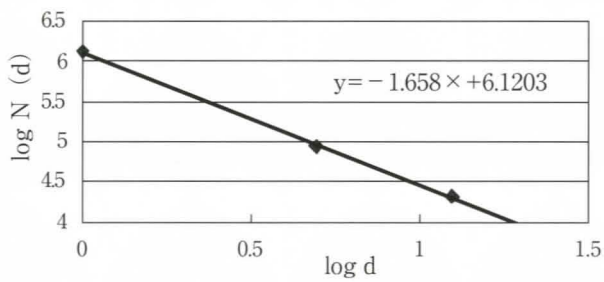


Fig. 6.7 観音地区上部の logd- logN (d)

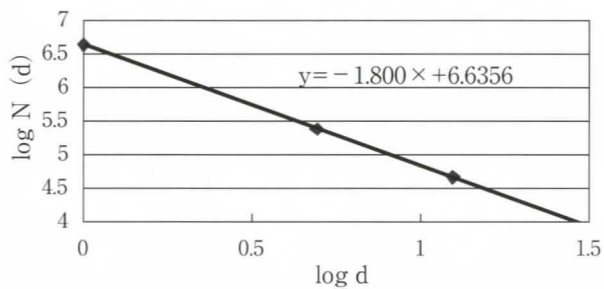


Fig. 6.8 観音地区中部の logd- logN (d)

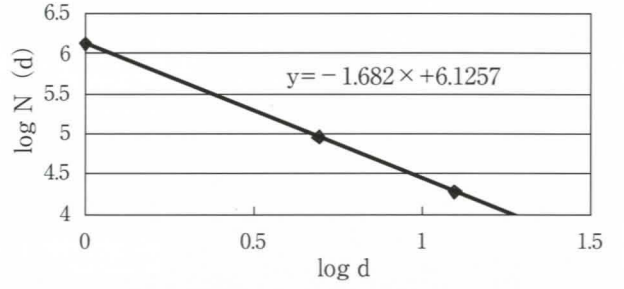


Fig. 6.9 観音地区下部の logd- logN (d)

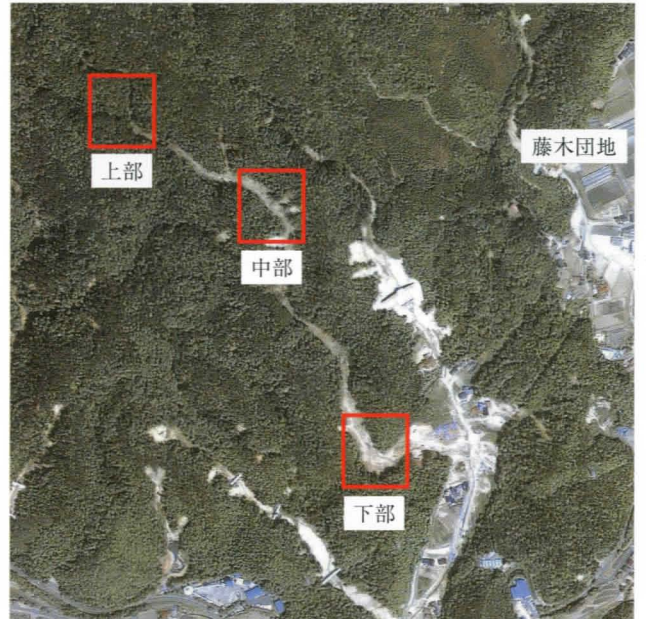


Fig. 6.10 上小深川地区全体図 (1500×1500)

Table. 6.3 上小深川地区測定結果

	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
上部	1	1078	0.000	6.983
	2	298	0.693	5.697
	3	148	1.099	4.997
中部	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
	1	1664	0.000	7.417
	2	433	0.693	6.071
3	210	1.099	5.347	
下部	d (画素)	N (d)	log d	log N (d)
	1	2162	0.000	7.679
	2	691	0.693	6.538
3	329	1.099	5.796	

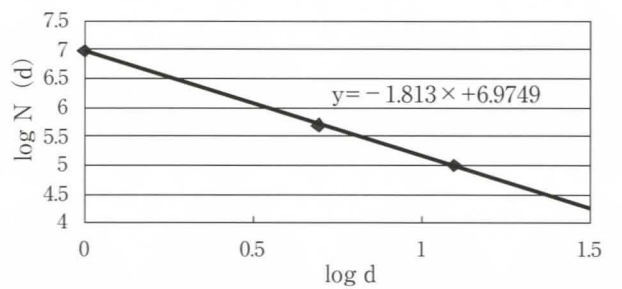


Fig. 6.11 上小深川地区上部の logd- logN (d)

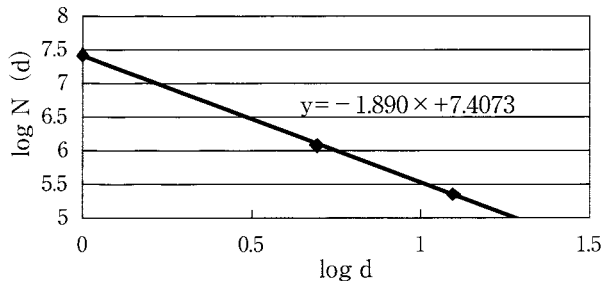


Fig. 6.12 上小深川地区中部の logd- logN (d)

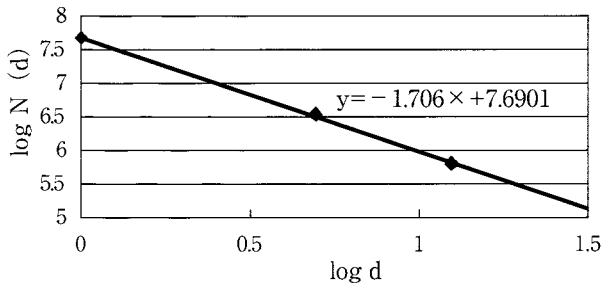


Fig. 6.13 上小深川地区下部の logd- logN (d)

7. 安定解析結果とフラクタル解析結果との比較

屋代地区と上小深川地区は、実験結果、安定解析結果が共に似た値を示しており、フラクタル解析結果においても似た値を示している。この結果から、屋代地区と上小深川地区の崩壊形態が類似していると考えられる。

Fig. 7.1 に屋代地区の上部と下部の安全率とフラクタル次元の関係を示す。上部と下部を比較すると、安定解析結果は、上部のほうが下部よりも安全率が低い値を示している。しかし、フラクタル解析結果は、上部のほうが下部よりも高い値を示している。これは、フラクタル次元が高いということは、それだけその場所は複雑に入り組んでいるといえるので、複雑な構造をしている分安全率は危険側に出ているのだと考える。

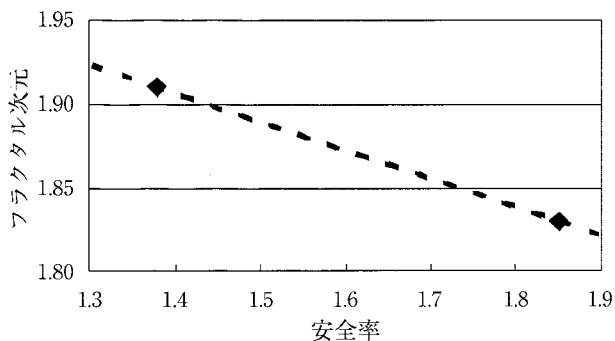


Fig. 7.1 安全率-フラクタル次元 (屋代)

Fig. 7.2 に、上小深川地区の上部と下部の安全率とフラクタル次元の関係を示す。上部と下部を比較すると、屋代

地区と同様、安定解析結果は、上部のほうが下部よりも危険と出ている。しかし、フラクタル解析結果は、上部のほうが下部よりも高い値を示している。

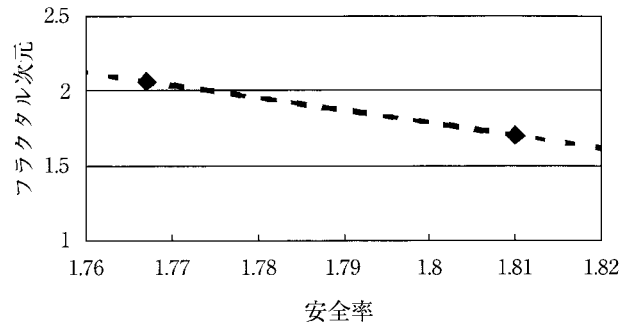


Fig. 7.2 安全率-フラクタル次元 (上小深川)

8. ま と め

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屋代地区、観音地区、上小深川地区においてフラクタル性評価を行った。その結果と、それぞれの崩壊斜面の土質試験結果、斜面安定解析結果を比較・検討した。そこで、フラクタル性評価および比較・検討によって得られた結論を挙げる。

- (1) 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。
- (2) 衛星データを用いたフラクタル性評価は、三箇所における測定結果が、フラクタル性を有していたため、この方法は有用であると考えられる。
- (3) 安全率が低いとフラクタル次元は高いという結果から、斜面の安全率とフラクタル次元には相関性があると考えられる。

以上の結果から、斜面崩壊形態とフラクタル次元は深い関係があると考えられる。

今後は、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、安全率とフラクタル次元との関係を調べ、崩壊形態と崩壊要因を明らかにしていきたい。

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) 佐藤文隆, 蔵元由紀: イミダス 96, 集英社, pp962, 1996
- 2) 高安秀樹, 高安美佐子: 「フラクタルって何だろう」ダイヤモンド社, pp88, 1988
- 3) 後藤恵之輔, 川内 透, 内田 篤, 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・材料第13号」pp141~147, 1997
- 4) 内田篤志, 後藤恵之輔, 川内 透: 衛星数値データによるフラクタル次元の測定法とその適用例「応用地質第41巻,」第5号」pp256~266, 2000
- 5) 石村貞夫, 石村園子: 「フラクタル数学」東京図書, pp238, 1990
- 6) 同上, pp64
- 7) 岡部恒治: 「イミダス96」集英社, pp984, 1996
- 8) 前出4), pp69~75
- 9) 中村 真, 島 重章, 吉國 洋: 崩壊した斜面の調査および安定解析に関する研究「土木学会中国支部研究発表会発表概要集」土木学会中国支部, pp271, 2001
- 10) 中村 真, 島 重章, 吉國 洋: 崩壊した斜面の安定解析に関する研究「広島工業大学研究紀要」pp85, 2002
- 11) 中村 真, 島 重章: 産業廃棄物を混合した軽量盛土の斜面安定解析について「土木学会中国支部研究発表会発表概要集」土木学会中国支部, pp339, 2002