

東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学研究系自然環境学専攻
環境情報学分野

平成 24 年度

修士論文

あぶくま洞における鍾乳石の分布を規定する地形要因：

3D レーザー測量データを用いた解析

Geomorphological Factors Affecting Speleothem Distribution in
the Abukuma Cave, Japan: A 3D Laser Scanning Approach

2013 年 2 月 19 日提出

2012 年度 3 月修了

指導教員 小口 高 教授

47-116618 高山 知美

目次

1. 序論.....	1
2. 研究対象地.....	3
3. 現地測量による点群データの作成.....	6
3.1. 方法.....	6
3.2. 結果.....	7
4. 地形解析.....	13
4.1. 方法.....	13
4.2. 結果.....	16
5. 考察.....	32
6. 結論.....	38
謝辞.....	39
参考文献.....	40

1. 序論

日本の国土面積の 0.44%は、石灰岩・大理石・ドロマイドなどのからなる炭酸塩岩が基盤岩となっている（漆原・鹿島 1996）。炭酸塩岩は二酸化炭素を含む水によって溶食を受けるため、岩石中に空洞が発生することがある。このような空洞の中に鍾乳石が発生することもある。鍾乳石には様々な種類があるが、代表的なものに、*Stalactite* (図 1.1(a)) と *Stalagmite* (図 1.1(b)) がある。国内では *Stalactite* を鍾乳管やつらら石と呼び、*Stalagmite* を石筍と呼んでいる（以下 *Stalactite* をつらら石、*Stalagmite* を石筍と表記する）。石灰岩に形成された空洞が外気と通じると、CO₂分圧が低下する。これにより、滴下する水に溶存しきれなくなった炭酸カルシウムが、水滴の接触部に方解石として集積し始める。こうして鍾乳管やヘリクタイトと呼ばれる鍾乳石が発生し、その成長速度が早ければつらら石となり、洞床に落下した水は石筍を形成する（漆原 1996a）。

鍾乳石の研究は様々な分野で行われている。例えば鍾乳石の成分の年代を測定して古気候を解析した研究がある。Wang et al. (2001) は中国の洞窟にある石筍の年代測定の結果が、グリーンランドのアイスコアの年代測定の結果とよく一致することを指摘した。また、地震と鍾乳石の関係を調べた研究もある。地殻物理学 (Tectonophysics) の分野では、Postpischl et al. (1991) が石筍の年代測定を行い、その地域の地震記録との間に強い相関があることを指摘した。鍾乳石の年代決定には様々な方法があるが、放射性炭素年代測定を用いることが多い。（Wang et al. 2001, Postpischl et al. 1991 など）。これにより鍾乳石内に生じる層の年代を求め、層の厚さや過去の気候・出来事との関連を調べることが可能である。

鍾乳石の発生と成長についての調査も、いくつか行われており、Baldini (2010) は水の滴下が速い場所では、つらら石より石筍の方が優先的に形成されることを示した。また、Kim and Sanderson (2010) は、つらら石の大きさと分布が、岩の割れ目によって強く規定されることを指摘した。他にも、スカラップと呼ばれる特殊な形の鍾乳石の形態を、型どりゲージで直接測って解析した研究や（漆原 1996b）、割れ目と鍾乳石の分布をフィールドで観察・計測した研究（Kim and Sanderson 2010）などがある。

ただし鍾乳石の分布や形態について地形学的な解析を行った研究はまだ少ない。とくに、近年地形解析に用いられるようになった 3D レーザースキャナーを用いて、鍾乳石の形態を詳しく解析した研究はあまり見られない。3D レーザースキャナーは地形の高解像度・高密度なデータを得るための有用な手法である（桑野・佐々木, 2003 ; Heritage and Large, 2009 ; Shan and Toth, 2009; Viero et al., 2010）。例えば小元ら (2011) は、石灰華段丘の詳細な地図を作成するために 3D レーザースキャナーによる測量を行った。またイギリスでは人工洞窟の形状を記録するために、3D レーザースキャナーによる洞窟内部の測量が行われた（Trent & Peak Archaeology 2012）。Diego et al. (2009) は、洞窟内にある壁画の計測と、形状モデルを作成する方法として、3D レーザースキャナーによる測量を提唱した。ただし上記のような研究は、大半が鍾乳石や壁画などの保護や記録を目的としており、地形学的な解析が行

われたものは少ない。従来の鍾乳石の形状に関する研究では、測量に時間がかかるため、少数の鍾乳石を局所的に調べたものが多い。例えば漆原（1996）のスカラップの形成に関する調査や、Kim and Sanderson（2010）の割れ目にそった鍾乳石の分布調査などである。しかし3D スキャナーを用いれば、従来では測量が難しかった複雑な天井面の詳しい地形データを得ることができ、広域的に多数の鍾乳石を調べることができる。そこで本研究では、3D レーザースキャナーを用いて鍾乳石の計測を行い、鍾乳石の発生と地形との関係を調査する。

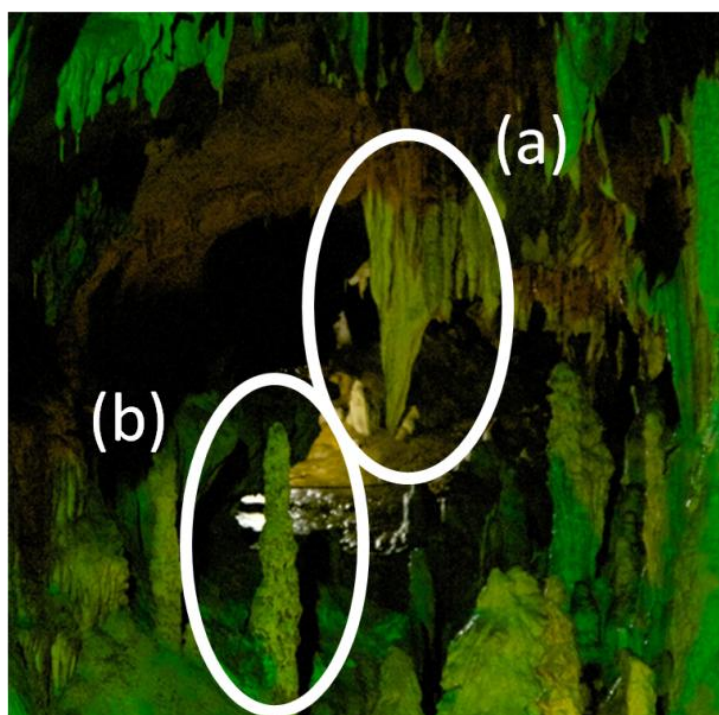


図 1.1. つらら石 (a) と石筍 (b).

2. 研究対象地

研究対象地は、福島県田村市滝根町の仙台平に位置するあぶくま洞である（図 2.1）。あぶくま洞は自然の鍾乳洞であり、おもに粒径 数 mm～2 cm の粗粒な方解石の結晶からなる結晶質石灰岩の中に位置している（日本の地質『東北地方』編集委員会 1989）。この地域には、あぶくま洞の他にも入水鍾乳洞など複数の洞窟があり、小規模なドリーネも複数形成されている（漆原 1998）。

あぶくま洞では、2004 年にあぶくま洞環境保護調査団による測量が行われている。図 2.2 はその際に作成された測量図である。あぶくま洞は高低差が最低でも 149 m あり、全体の正確な長さは不明だが、総延長は 3104.2 m まで確認されている（あぶくま洞環境保護調査団 2004）。現在あぶくま洞には 5 つの洞口があり、そのうち 2 つは観光向けに作られた人工の洞口である（あぶくま洞環境保護調査団 2004）。入口の一つは、あぶくま洞の北東約 350 m、標高約 740 m の地点に位置する鬼穴と呼ばれるドリーネに位置する（図 2.1）そのドリーネから地表の流水が吸い込まれ、あぶくま洞をへて台地の西側へ流出する（漆原 1998）。

あぶくま洞は 1969 年に発見され、当時は釜山鍾乳と呼ばれていた。その後 1971 年に滝根町の天然記念物に指定され、現在は町が合併して田村市の天然記念物に指定されている。あぶくま洞は一部を一般に公開している観光地で、公開部分は計 546.3 m である。また、発見されてからすぐに天然記念物に指定されたため、鍾乳石の保存状態が良い。鍾乳石が豊富で内部の空間も広いため、今回の調査地に適していると考えた。測量はあぶくま洞内の滝根御殿と呼ばれる空間で行なった。滝根御殿は鍾乳石が豊富な、高さ約 29 m の広いドーム状の空間である。公開部分の最奥地であり、足場は舗装されている部分もあるが、天井面や壁面の保存状態が良い。

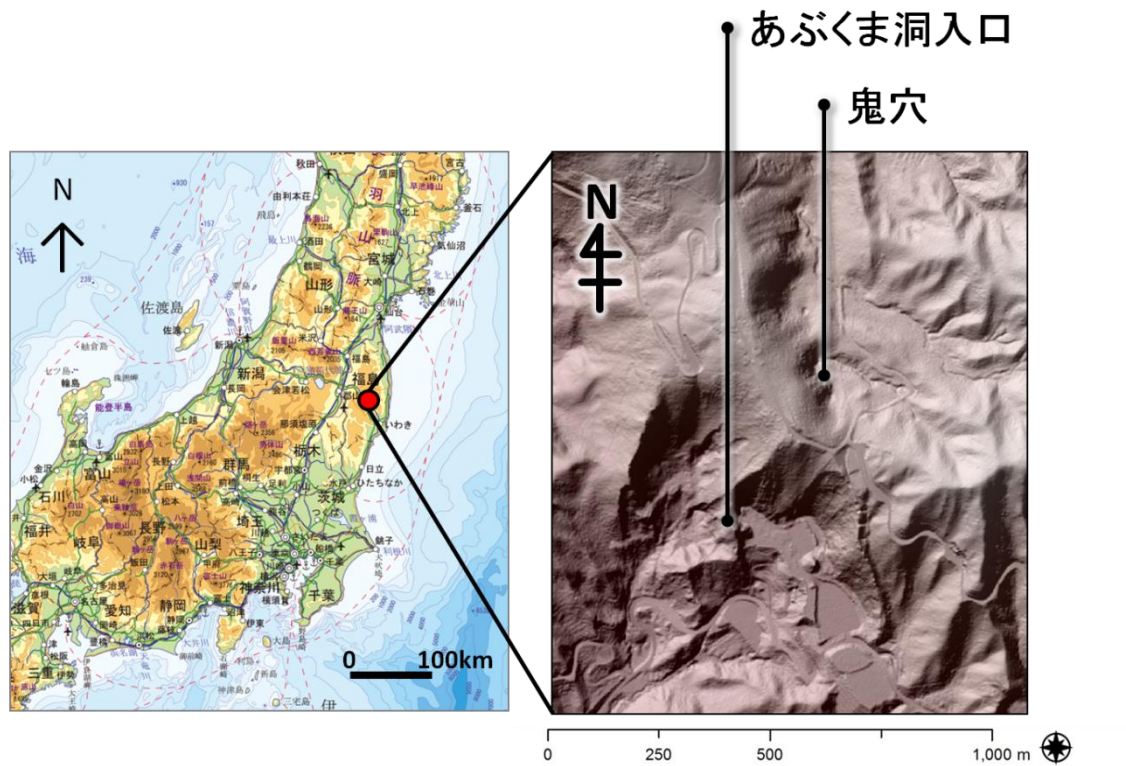


図 2.1. あぶくま洞と鬼穴の位置. 背景には国土地理院・電子国土 Web, 国際航業 RAMS-e (航空レーザ測量による 2 m DEM) をそれぞれ使用.

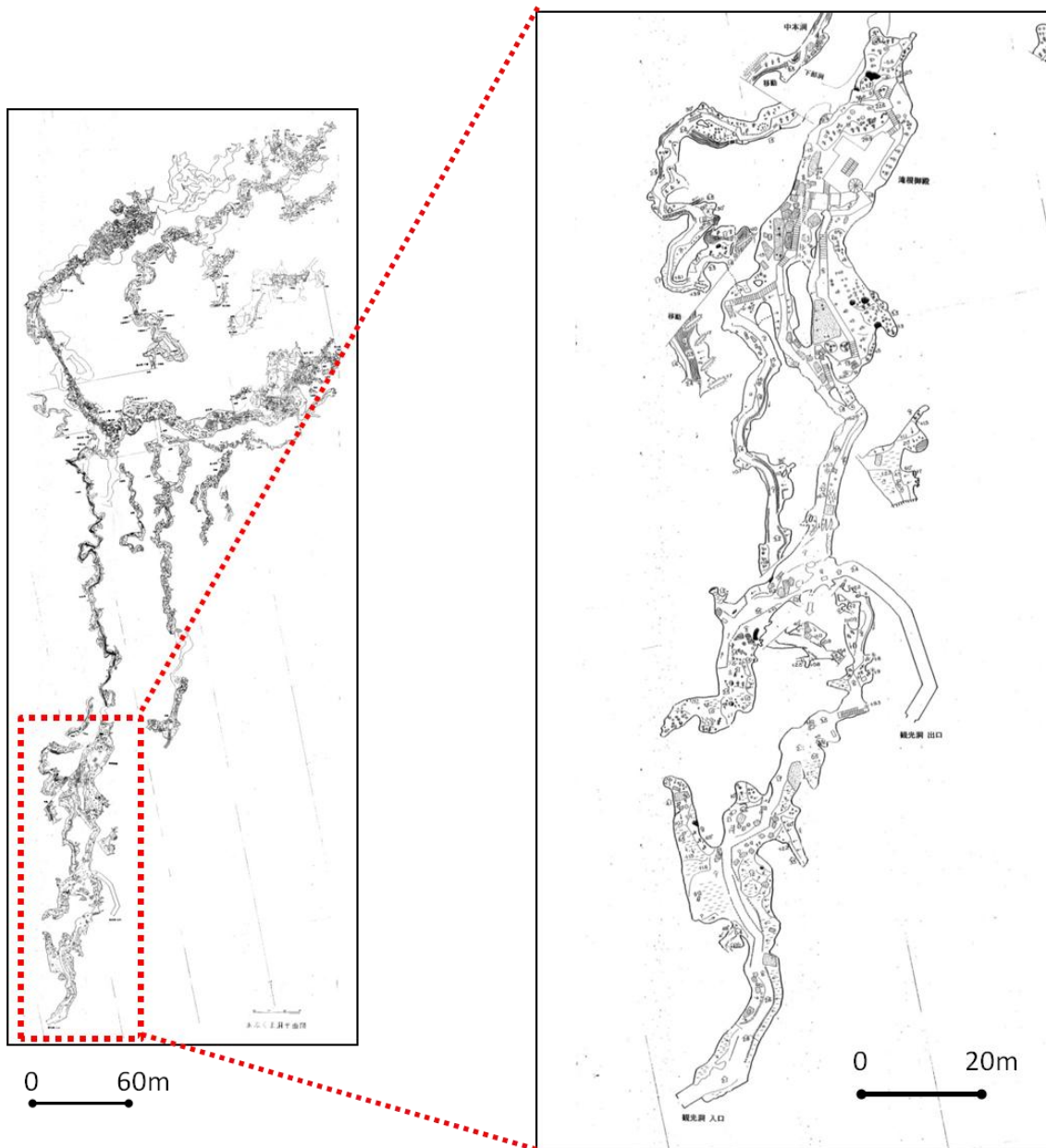


図 2.2 あぶくま洞の平面図（あぶくま洞環境保護調査団 2004）.
 （左：全体図，右：公開部）

3. 現地測量による点群データの作成

3D レーザースキャナーを用いた測量，スキャン・オブジェクトの結合，点群（詳細は後述）と座標値の抽出を行った．まず，解析に必要な 3D データを得るために，あぶくま洞の測量を行った．測量には 3D レーザースキャナー GLS-1500（トプコン）（図 3.1）を用いた．次に，測量データを処理するソフトウェアである ScanMaster（トプコン 2010）を用いて，得られたスキャン・オブジェクトから一連の 3D 点群を作成した．さらに，3D 点群を処理するソフトウェアである Image Master（トプコン 2010）を用いて，つらら石の座標と天井面の点群を抽出した．

3.1. 方法

3D レーザースキャナーは，スキャナー本体を原点とし，周囲の物体の座標値を計測する．GLS-1500 の測定可能距離は最大 500 m であり，1 秒間に最大 3 万点をスキャン可能である．最大計測密度は 1 mm（距離 20 m 地点）であり，150 m 先を 4 mm の精度でスキャンできる．測定範囲は鉛直方向に最大 $\pm 35^\circ$ ，水平方向に最大 360° であるが，傾斜台を使用すれば鉛直方向も最大 360° 測定可能である．GLS-1500 により得られる基本データは，カメラ（CCD センサ）による画像データおよびレーザースキャニングによる 3D 点群データの 2 種類である（トプコン 2010）．3D 点群データは座標値の集まりであり，その座標値は，スキャナーの位置を原点とした 3 次元座標値である（門林 2003）．計測で得られた 3D 点群データに画像データから色情報（RGB）を取り込むカラーマッピングを行うことにより，色情報をもった点群データを作成することができる．



図 3.1. 3D レーザースキャナー GLS-1500.

鍾乳洞のような複雑な地形を測量する際には、一ヶ所からのレーザー照射では影になる部分を含めてデータを得るため、スキャンを複数の地点から行う。このようなデータを一つにまとめて解析を行うために、複数のスキャン・オブジェクトを結合し、1つの点群を作成する必要がある。この編集には前記の ScanMaster を使用する。また、編集して1つに繋げた点群から、分布図の作成に必要なデータを抽出する。抽出するデータは、①天井面の3D点群と②つらら石の先端の座標値である。この際には前記の Image Master を使用する。

3.2. 結果

測量はあぶくま洞の滝根御殿と呼ばれる空間で、2012年7月6日と7月13日の2日間行なった。前記のように良質の測量データを得るために、滝根御殿内の4ヶ所からスキャンを行った。図3.2の①から④は、測量した場所と測量した順番を示している。①では角度を変えて2回測量した。②③④は、角度を変えて各地点で3回測量した(図3.3)。測量で得られた点群のポイント数(座標値数)は12,489,221であった。得られた複数のスキャン・オブジェクトを結合して1つの点群を作成する際には、ターゲットと呼ばれるコントロール・ポイントが必要となる。このターゲットは計8箇所に設置した。

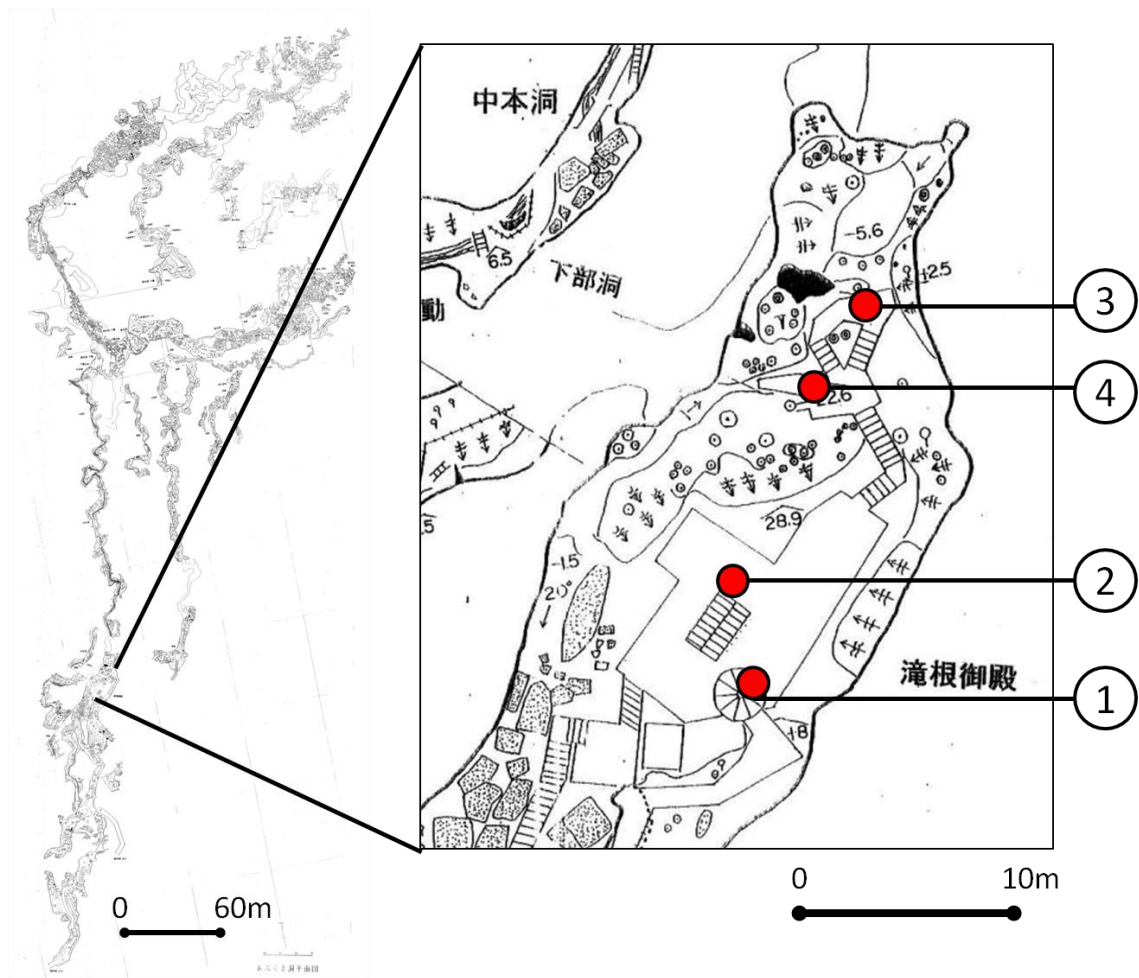


図 3.2. 測量場所と測量順序.

(測量図は 2004 年にあぶくま洞環境保護調査団が作成したもの).

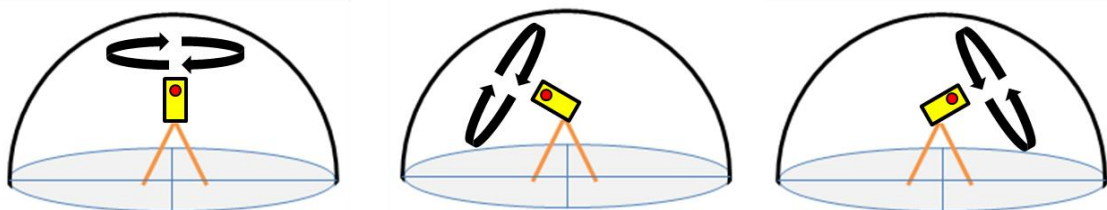


図 3.3. 3D レーザースキャナーによる測量のイメージ図.

(左から 1 回目, 2 回目, 3 回目の測量を表わす. 最初は水平に測量, 2 回目, 3 回目はそれぞれ上下に 60°角度を変えて測量).

未編集の 3D 点群では反射強度などによる色判別しか行えないため, 鍾乳石の位置や奥行きを判読することが難しい. そのため点群データに CCD センサで取得した画像の色情報

(RGB) を取り込むカラーマッピングを行った (図 3.4). その後, 目印であるターゲット同士を合わせ, 色のついた複数の点群を 1 つに繋げるレジストレーションを行った (図 3.5).

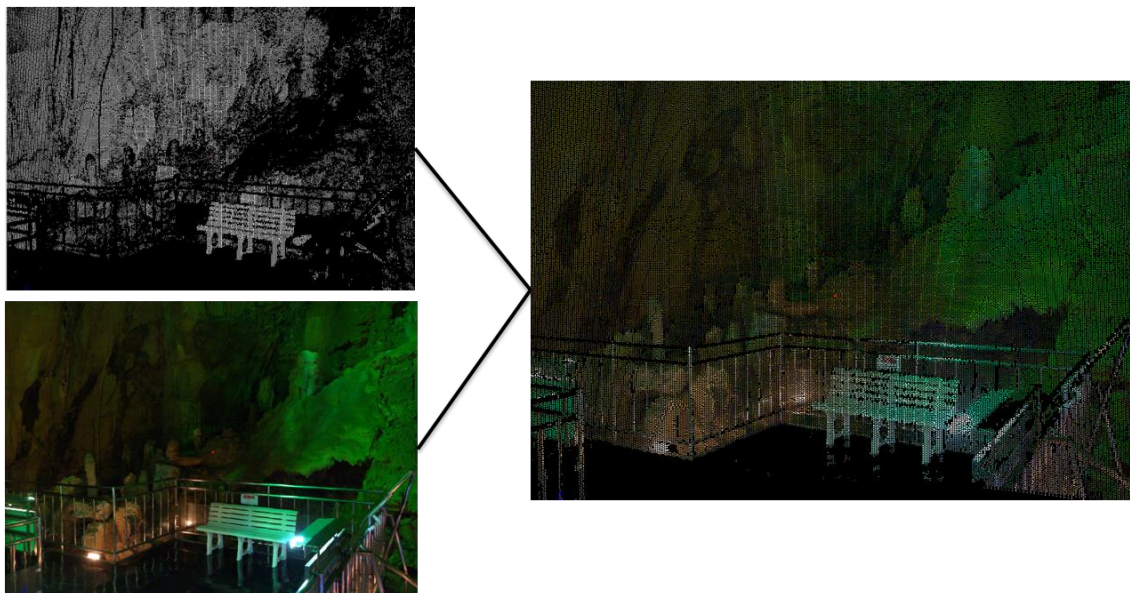


図 3.4 スキャンオブジェクト結合.
(左上: 3D 点群, 左下: 写真, 右: 色情報をもった点群).

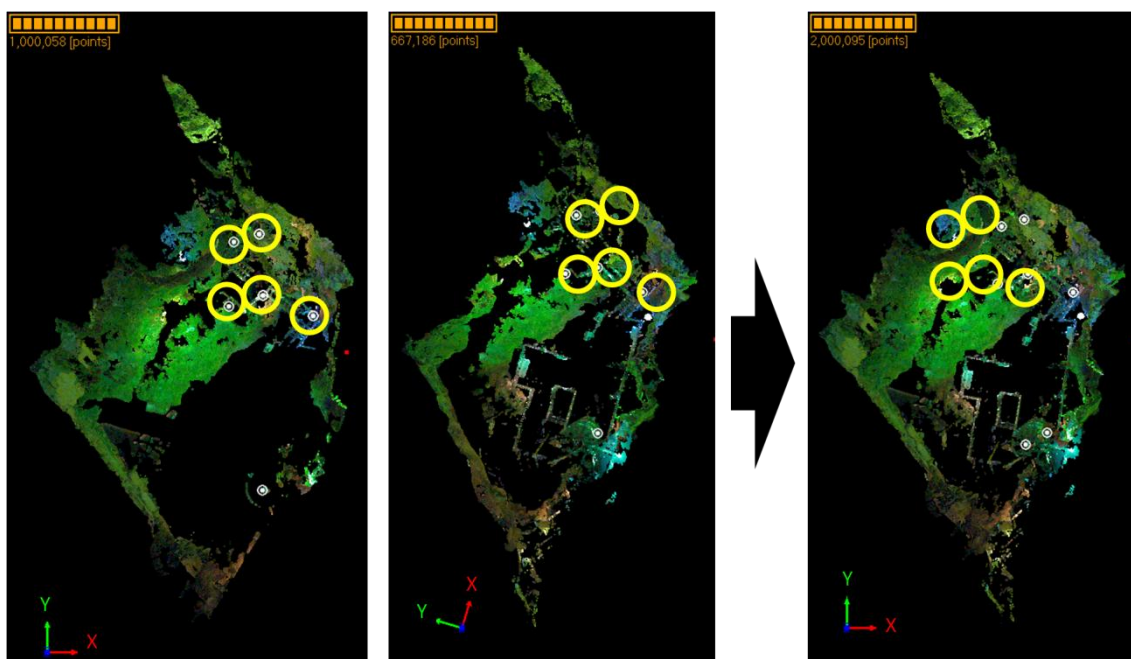


図 3.5 結合前の点群と結合後の点群.
(全て真上から俯瞰した図. 左・中央: レジストレーション前の点群, 右: レジストレーション後の点群, 黄色い丸: レジストレーションに使用したターゲット).

Image Master を用いて 1 つにまとめた点群から、①滝根御殿全体の天井面の 3D 点群と②つらら石の先端の座標値を抽出した。天井面の点群は、データをそのまま使用するとデータサイズが大きすぎて実質的に処理できないため、8 分の 1 に間引いて使用した。図 3.6 の左が滝根御殿全体のオリジナルな点群であり、右が間引きを行った後の天井面の点群である。右の図は左の図の点線で囲まれた部分と一致する。なお、4.2 節で述べるように、ポイント数を間引いても、後の解析への影響はほとんどない。一方、つらら石は三次元座標上の多方向から確認のうえ目視で抽出し、その先端の座標値を記録した (図 3.7)。抽出した座標値は計 2,328 個である。

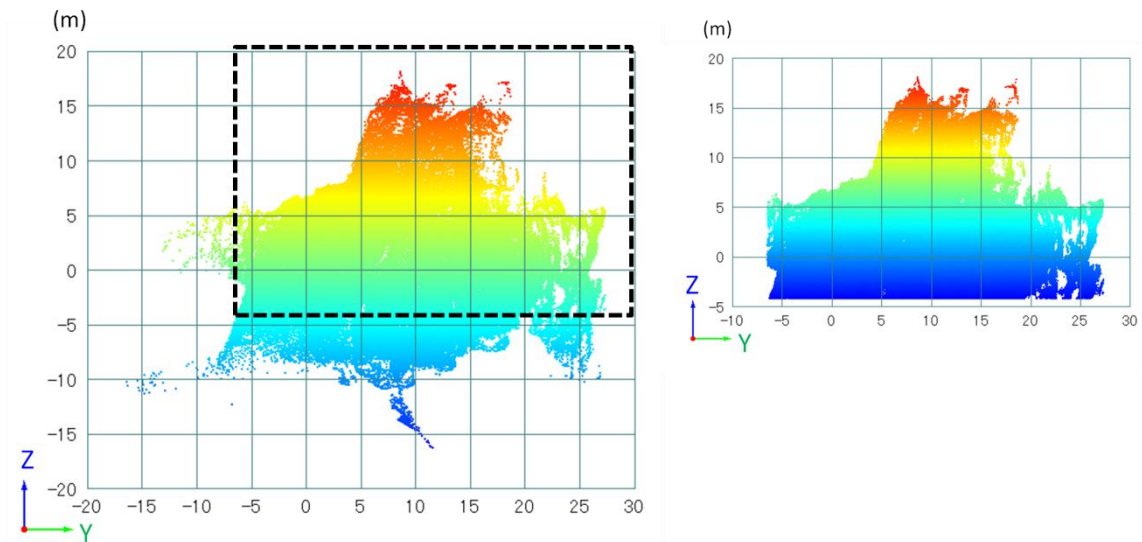


図 3.6 天井面の 3D 点群の抽出。

(左：抽出前の 3D 点群，右：抽出後 8 分の 1 に間引いた 3D 点群)。



図 3.7 選択されたつらら石の先端.
(赤い点が選択された部分).

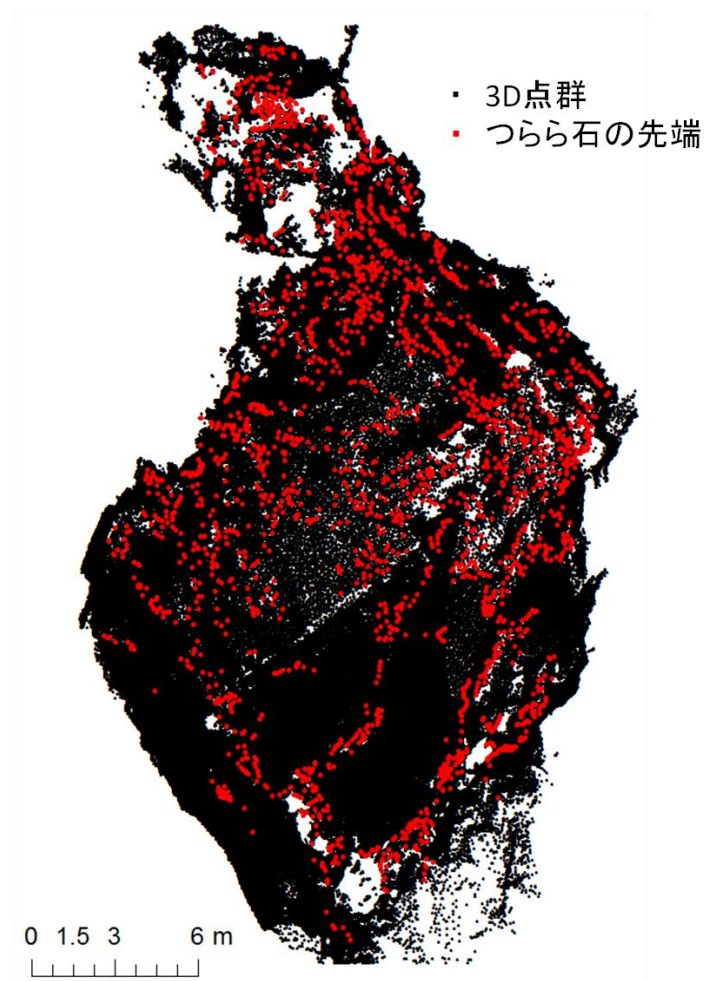


図 3.8. つらら石の水平分布.

4. 地形解析

GIS ソフトウェア ArcGIS (ESRI 社製) を用いて、つらら石の分布とそれを規定する地形要因について解析を行った。用いたデータは、第一計測起点におけるスキヤナからの高さを表す天井面の 5 cm 解像度の標高グリッド、天井面の傾斜角の分布、天井面の曲率の分布、つらら石の座標値である。そこから、1 m 解像度のグリッド・セルにおけるつらら石数、傾斜角の平均値、傾斜角の標準偏差、曲率の平均値を求め、それらの関係を調べた。1 m グリッドは 485 セルで構成される (図 4.1)。指標に傾斜角と曲率を用いたのは、これらが地形の特徴を表す基礎的な指標であるためである。

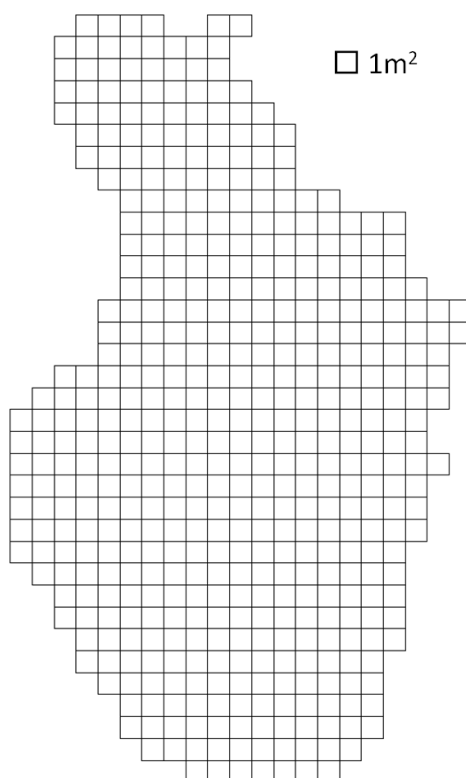


図 4.1. 1m 解像度のグリッド・セル

4.1. 方法

天井面の標高データは、ArcGIS で読み込んだ時点ではポイントデータであり、連続性が無く、分布に偏りがあるため、そのままでは解析が難しい。そこでポイントデータをラスタデータに変換した。まず、ポイントデータから TIN (Triangled Irregular Network, 不規則三角形網) を作成した。TIN は地表を連続した三角形の格子で覆い、頂点に標高情報を与えた空間データである (橋本 2012)。この TIN データの端の部分には、図 4.1 のようにエッジが極端に長い三角形が作成されてしまう。そのため、エッジの長すぎる三角形を除外してから、TIN データを 5 cm 解像度のラスタデータに変換した。変換の際には ArcGIS の補間機能の一つである Natural neighbors を用いた。天井面の標高ラスタデータは、通

常の地表の地形データと同様に、投影面を地表に対して水平に設定し、真上から俯瞰した状態のものを作成した。そのため、つらら石が下向きに低くなっている。

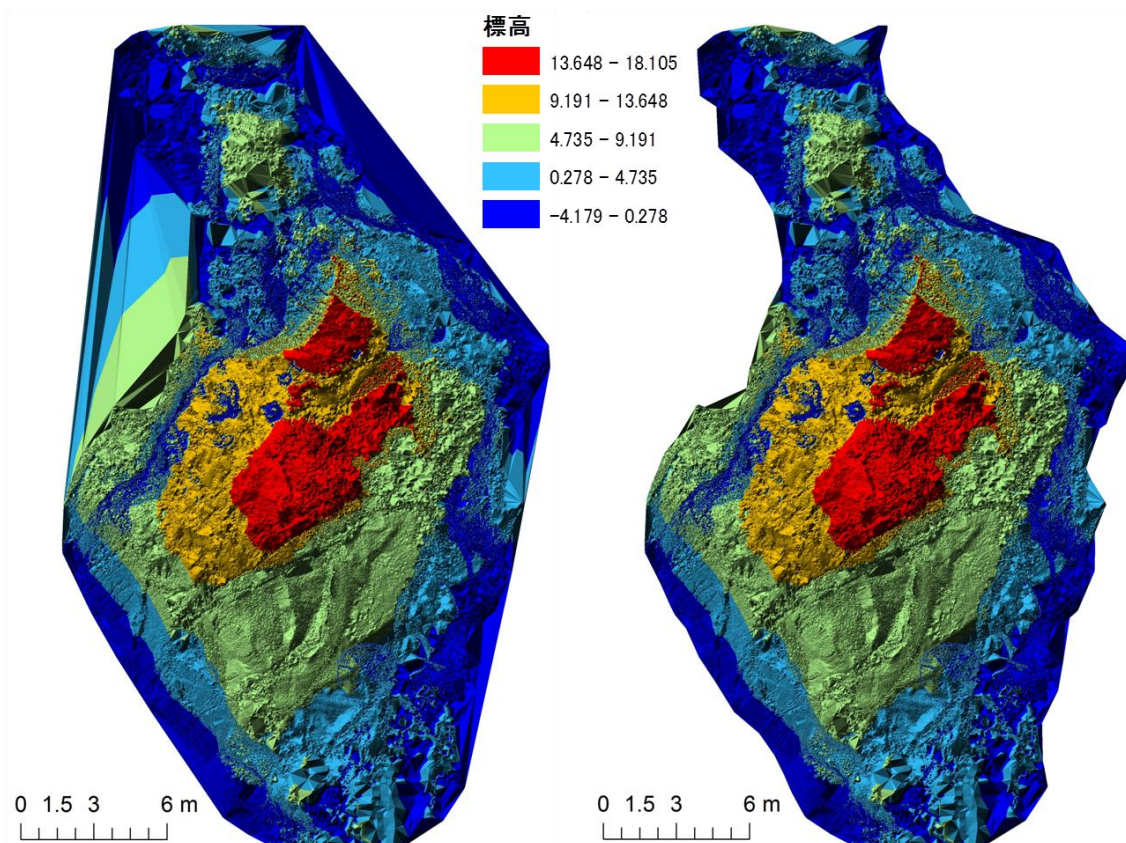


図 4.2. エッジを除去する前の TIN データ (左) とエッジ除去後の TIN データ (右)。

変換された標高ラスタデータは、天井面だけでなく多くのつらら石を含んでいるため、近傍解析 (ハイパスフィルタ) を行ってつらら石を除外した。すなわち、あるセルにおける近傍の検索範囲の中での標高の最大値を、つらら石の基部となる天井面の標高とみなし、そのセルに与えた (Bonham-Carter, 1994)。円形の検索範囲の直径を 0.5–1.0 m の範囲で試行したところ、つらら石を効果的に除去できる最少の検索範囲は直径 0.8 m であった。これにより得られた標高ラスタデータを天井面のラスタデータとして、以下の解析に用いる。

天井面の標高ラスタから、1 m グリッドごとに傾斜角の平均値、傾斜角の標準偏差、および曲率の平均値を算出した。傾斜角は Burrough (1998) の方法を用いて算出し、曲率は Moore (1991) の方法を用いて算出した。傾斜角の単位は「度」を用いた。以下が傾斜角と曲率の算出方法である。

$$\text{傾斜角} = \tan^{-1} (\sqrt{[dz/dx]^2 + [dz/dy]^2}) * 180 / \pi$$

ここで、 dz/dx , dz/dy はそれぞれラスタのx軸方向, y軸方向における標高の変化率であり, 近傍8セルの値を用いて計算される.

曲率 = $-2(D + E)$

ここで, D, Eはそれぞれ近傍3 x 3 セル領域内にフィットされた4次曲面

$$Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

の係数であり, 傾斜の変化率を示す. 単位は m^{-1} .

次に, 傾斜角の平均値・標準偏差, 曲率の平均値ごとに, つらら石保有セル率 (つらら石保有セル数/セル数) と1セルあたりの平均つらら石数 (つらら石数÷セル数) を求めた. 前者はつらら石の発生率を表し, 後者はつらら石の密度を表わす.

また, 傾斜角とつらら石の分布の関連を調べるために, (1) 傾斜角の平均値とつらら石保有セル率, (2) 傾斜角の平均値と1セルあたりのつらら石数, (3) 傾斜角の標準偏差とつらら石保有セル率, (4) 傾斜角の標準偏差と1セルあたりのつらら石数, を比較した. さらに曲率とつらら石の分布の関連を調べるために, (1) 曲率とつらら石保有セル率 (2) 曲率と1セルあたりのつらら石数, を比較した.

さらに, 天井面の地形特性の空間分布を定量的に評価するために, 傾斜角ラスタと曲率ラスタについて空間自己相関を求めた. 天井面を洞窟の幅の変化と天井面の標高を考慮して奥側から入口側の3つのエリアに区分し (図4.2), それぞれのエリアについて計算を行った. 空間自己相関の指標にはモランのIを用いた. この3つのエリアのそれぞれについて, つらら石保有セル率と1セルあたりのつらら石数も求め, それらを傾斜角の平均値・標準偏差, 曲率の平均値と比較し, エリアごとの特徴を調べた.

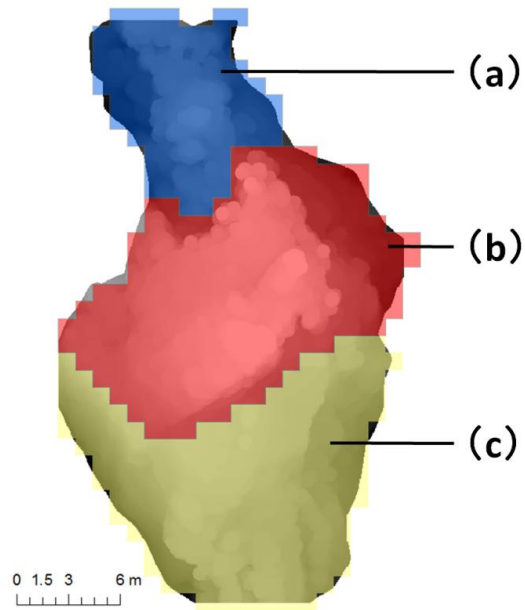


図 4.3. 滝根御殿の天井面を区分した 3 つのエリア. a が最奥部, b が中央部, c が入口側.

4.2. 結果

作成された天井面のラスタデータを図4.3に示す. スキャン範囲の中央で標高が高く, 周辺部で低くなる傾向が明瞭である.

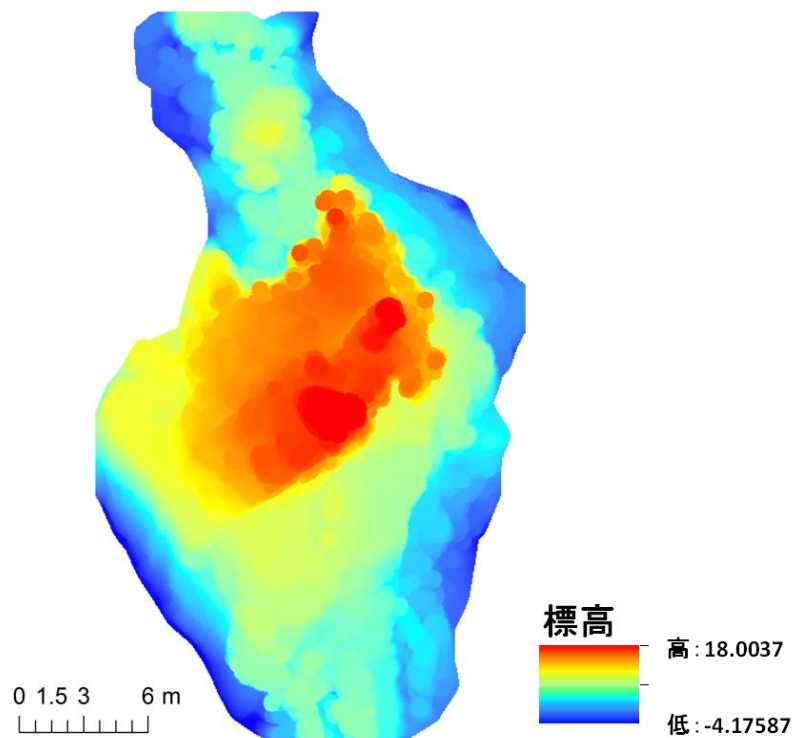


図 4.4. ハイパスフィルタにより作成した天井面の標高ラスタデータ（単位：m）.

傾斜角の平均値とつらら石の分布（図4.4～4.6，表4.1）を比較したところ，傾斜角が15°～48°の間でつらら石数が増加することが分かった．傾斜角の標準偏差とつらら石の分布（図4.7～4.9，表4.2）には正の相関が認められ，傾斜角の標準偏差が大きくなるほど，つらら石保有セル率と1セルあたりのつらら石数が増加した．

表4.1. 傾斜角の平均値の区間ごとにおけるつらら石の数と頻度.

傾斜角の平均(°)	セル数	つらら石保有セル数	つらら石保有セル率(%)	つらら石数	1セル(1m ²)あたりのつらら石数
>0	8	2	25.0	19	2.4
>15	60	36	60.0	356	5.9
>26	225	156	69.3	1121	5.0
>47	18	12	66.7	86	4.8
>48	95	71	74.7	597	6.3
>59	49	21	42.9	133	2.7
>70	30	6	20.0	20	0.7
合計	485	304		2332	
平均			51.2		4.0

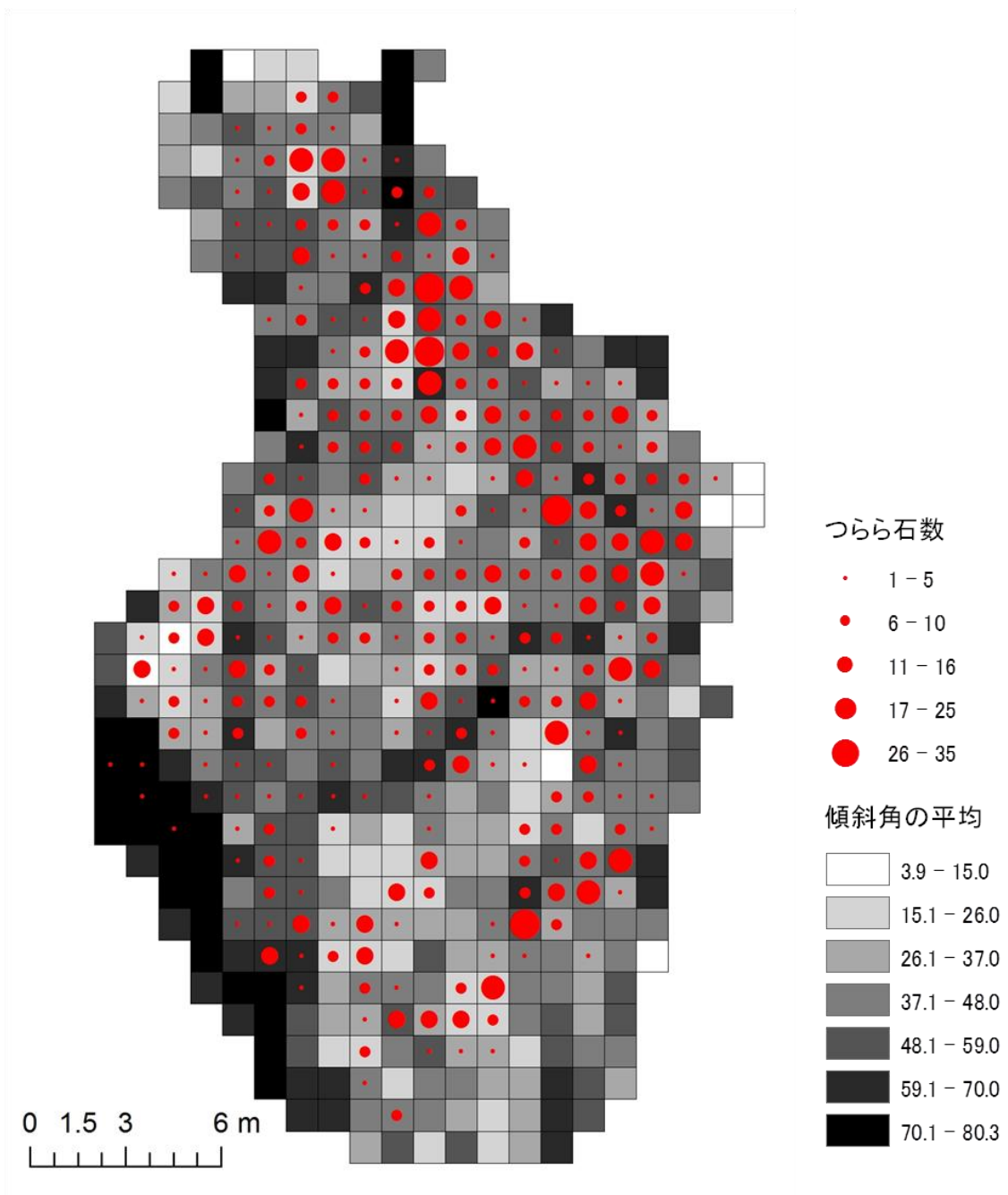


図 4.5. 1 m グリッドごとの傾斜角の平均 (度) とつらら石の数.

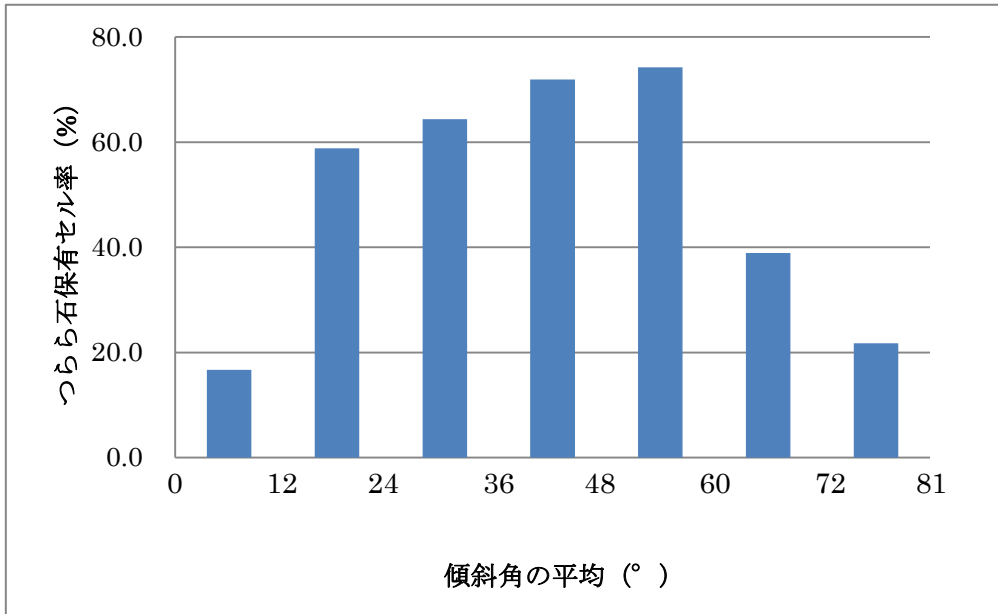


図 4.6. 傾斜角の平均値とつらら石保有セル率との関係.

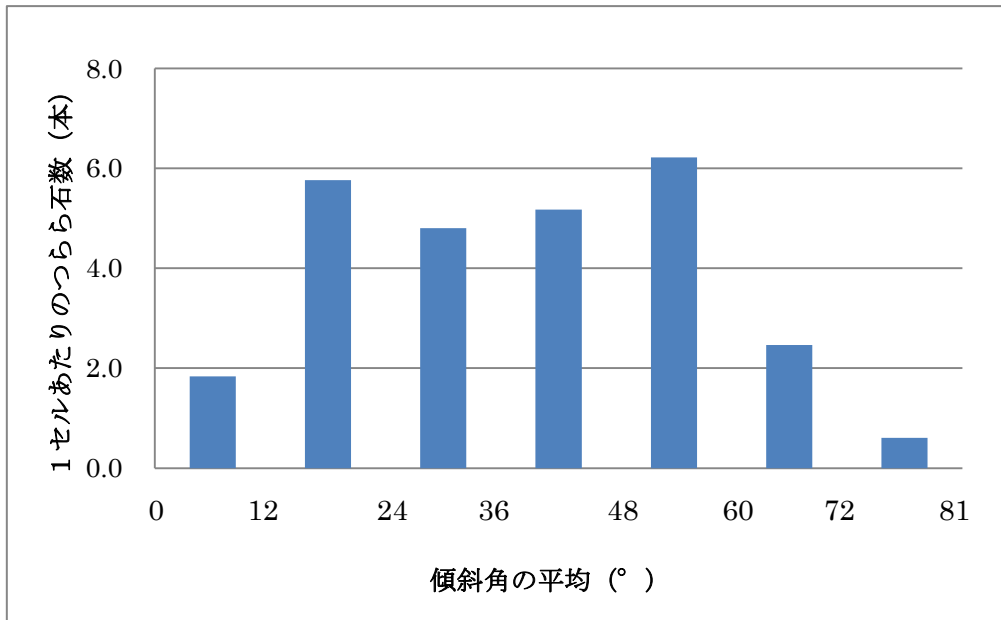


図 4.7. 傾斜角の平均値と1セルあたりのつらら石数との関係.

表 4.2. 傾斜角の標準偏差の区間ごとにおけるつらら石の数と頻度.

傾斜角の標準 偏差(度)	セル数	つらら石 保有セル数	つらら石保有 セル率(%)	つらら石数	1セル(1m ²)あたり のつらら石数
>0	21	3	14.3	8	0.4
>8.5	35	14	40.0	104	3.0
>14	61	32	52.5	225	3.7
>19.5	108	69	63.9	506	4.7
>25	132	93	70.5	739	5.6
>30.5	100	70	70.0	551	5.5
>36	28	23	82.1	199	7.1
合計	485	304		2332	
平均			56.2		4.3

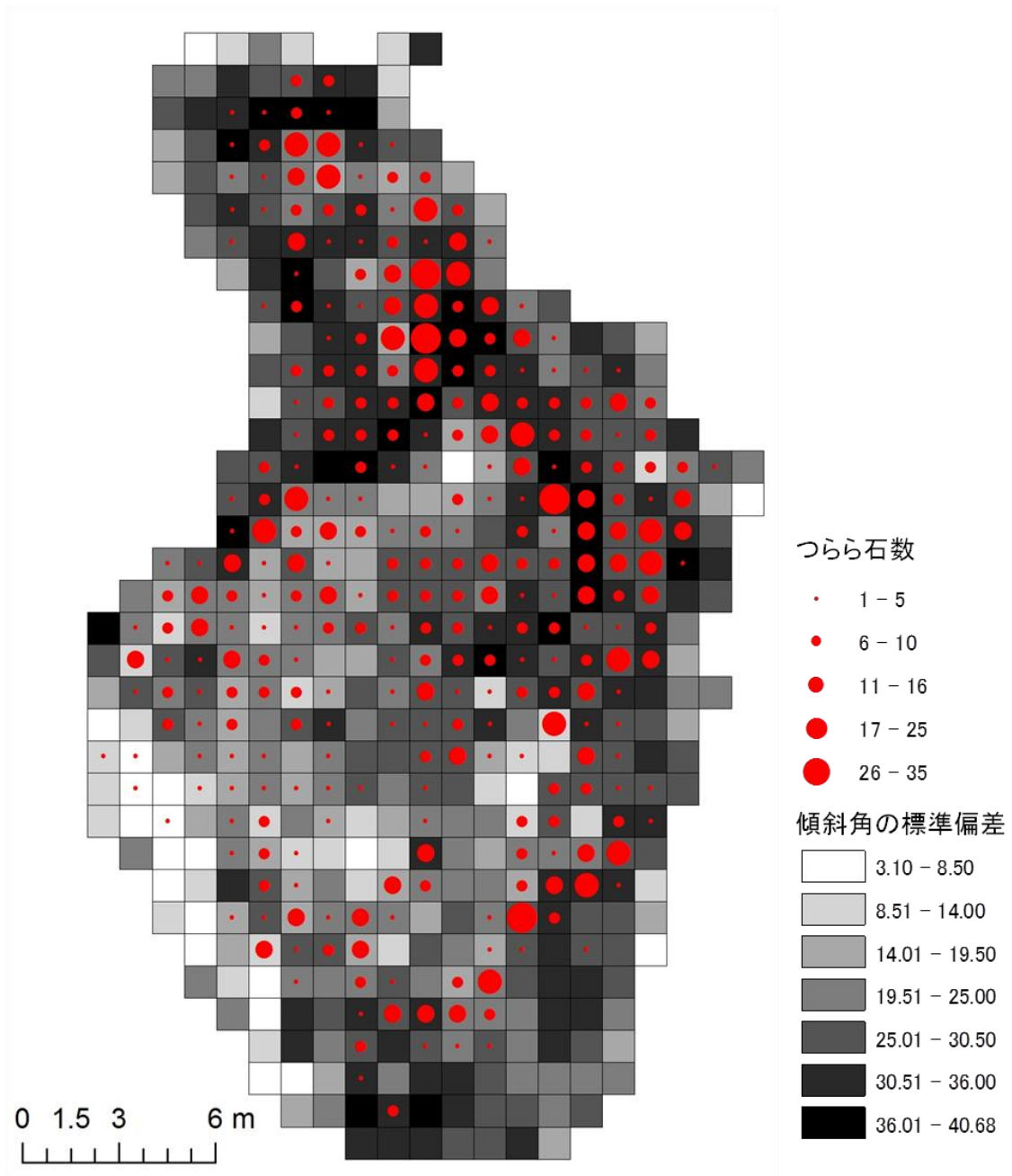


図 4.8. 1 m グリッドごとの傾斜角の標準偏差 (度) とつらら石の数.

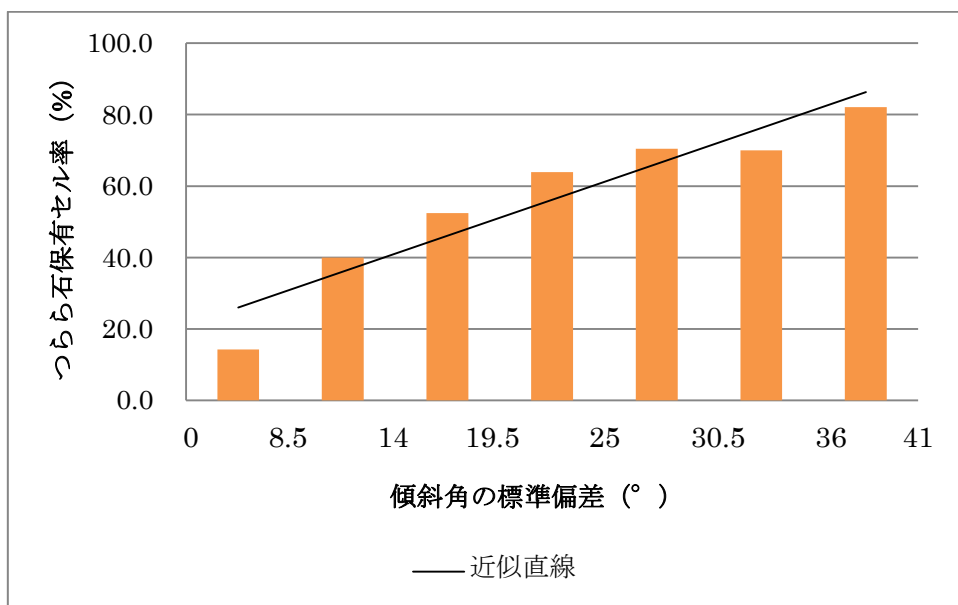


図 4.9. 傾斜角の標準偏差と石保有セル率との関係.

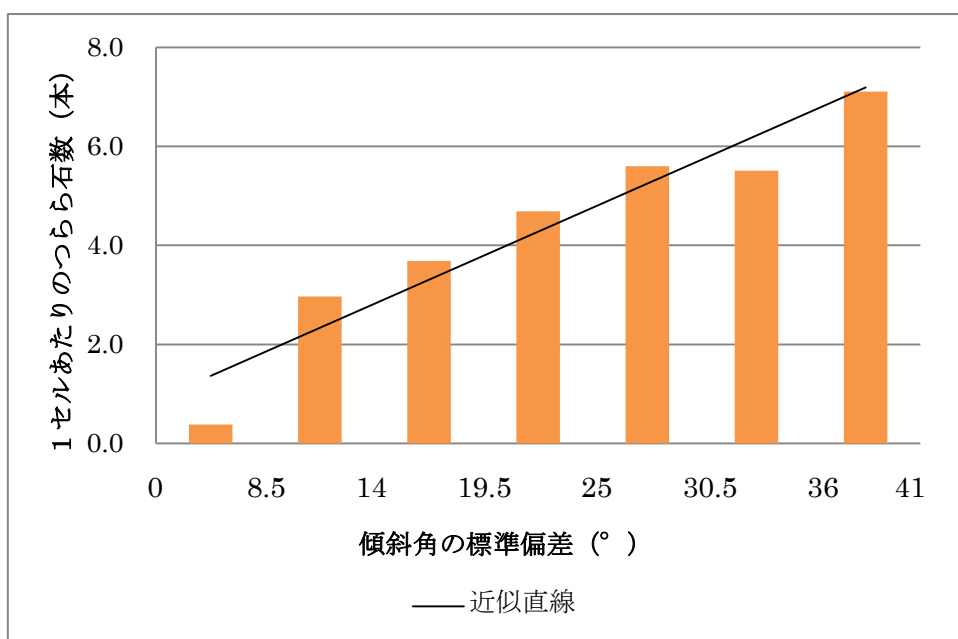


図 4.10. 傾斜角の標準偏差と1セルあたりのつらら石数との関係.

つらら石の分布と天井面の曲率の関係を調べたところ、曲率の正負ではなく曲率の絶対値との関係（図4.10～図4.12，表4.3）が明瞭と判明したため、以下では曲率の絶対値を用いた検討の結果を示す。曲率が大きくなるほど、つらら石保有セル率と1セルあたりのつらら石数が増加する傾向が認められた。上記の曲率に関する図表では曲率を対数で表現しているが、これは曲率がゼロに近い値をとりやすく、ゼロから大きく離れた値が出にくいことを考慮したためである。

表 4.3. 曲率の絶対値の区間ごとにおけるつらら石の数と頻度.

log 10					
曲率の絶対値 (m^{-1})	セル数	つらら石保有セル数	つらら石保有セル率	つらら石数	1セル ($1m^2$) あたりのつらら石数
>2.1	1	0	0	0	0
>2.5	15	3	20	38	2.5
>2.9	57	32	56.1	274	4.8
>3.3	142	90	63.4	612	4.3
>3.7	181	113	62.4	850	4.7
>4.1	68	50	73.5	366	5.4
>4.5	21	17	81	192	9.1
合計	485	305		2332	
平均			50.9		4.4

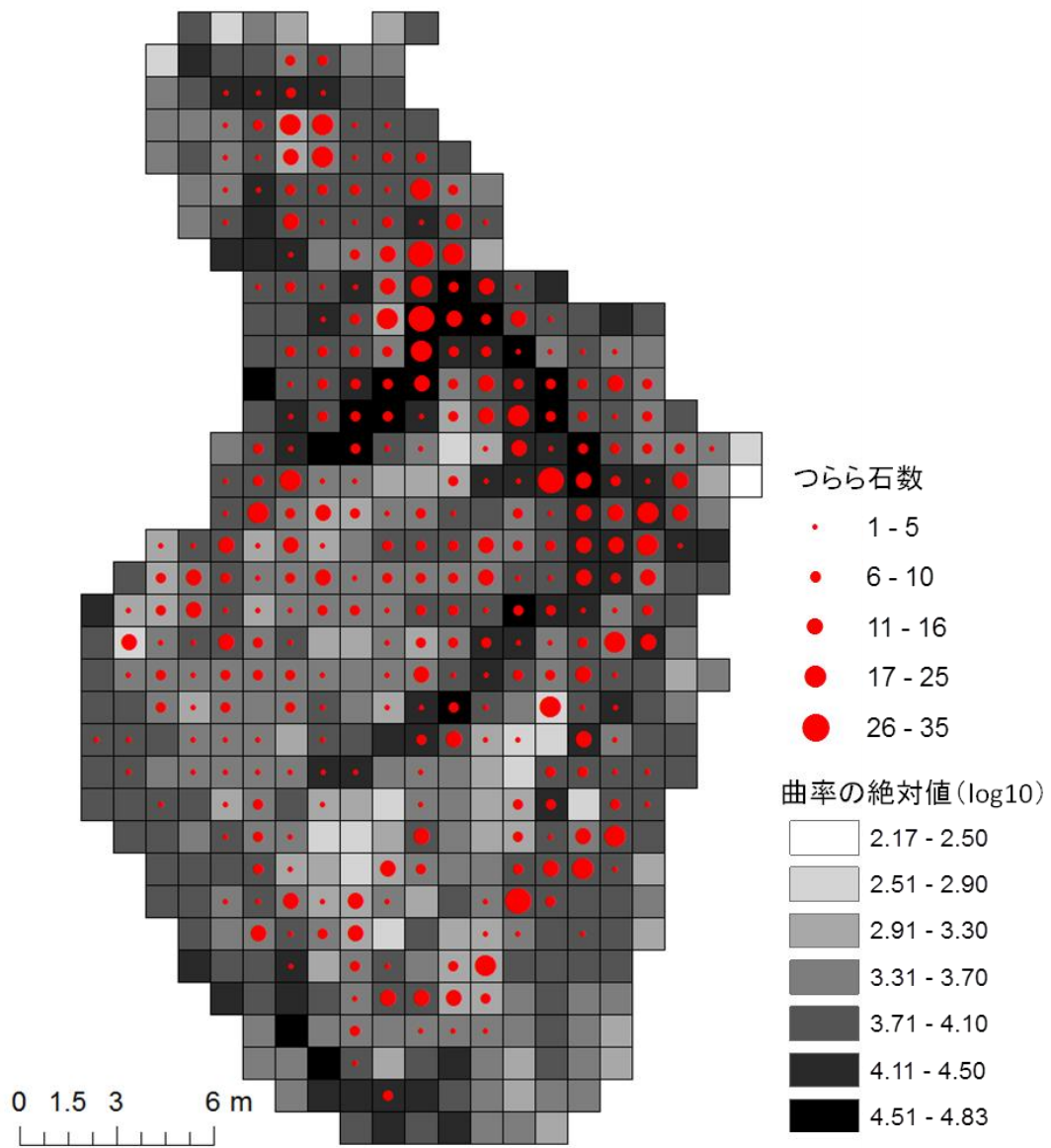


図 4.11. 1 m グリッドごとにおける曲率の絶対値 (m^{-1}) とつらら石の数.

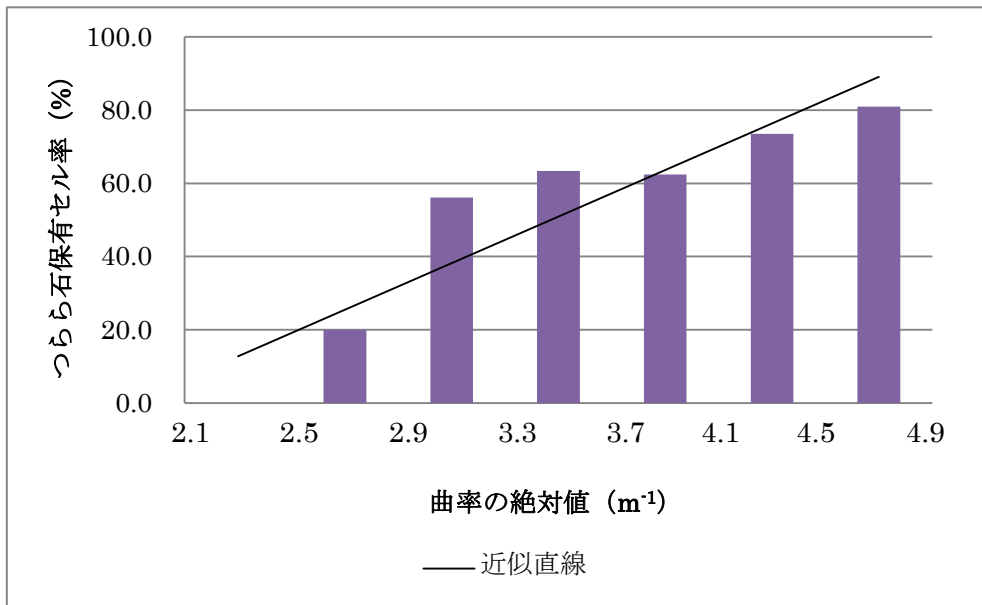


図 4.12. 曲率の絶対値とつらら石保有セル率との関係.

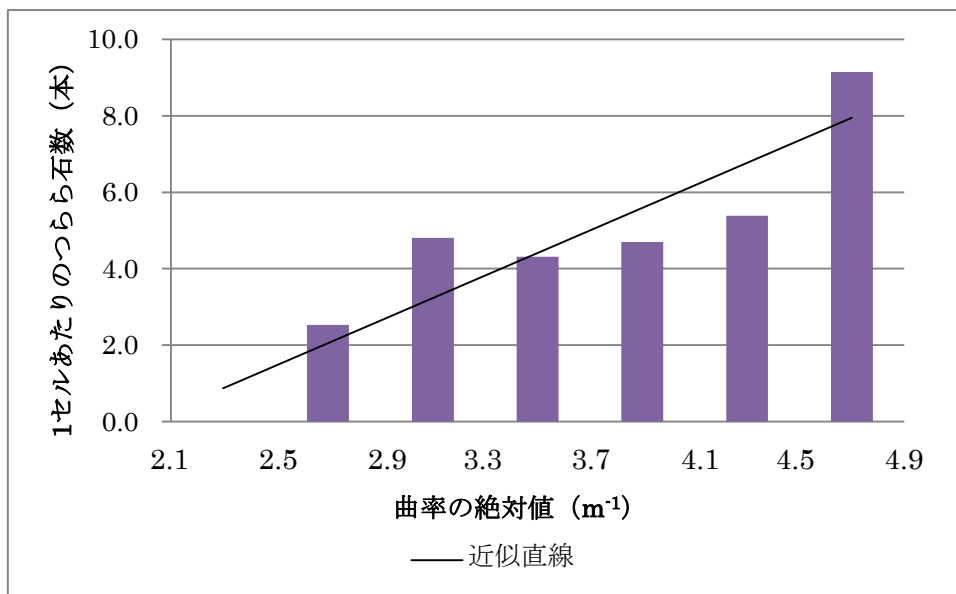


図 4.13. 曲率の絶対値と 1セルあたりのつらら石数との関係.

傾斜角ラスタの自己相関は、全体では0.822189、エリア(a)～(c)ではそれぞれ0.817313、0.793467、0.858952となり、いずれも正の自己相関があり、隣接したセルで似た値が分布していることが分かった。曲率ラスタの自己相関は全体では-0.079831、(a)～(c)ではそれぞれ-0.059033、-0.08536、-0.064523となり、いずれも自己相関が無く値がセルごとにランダムに分布することが分かった。

図4.13では傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値との関係を示す。プロットの大きさはつらら石数を示す。傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値との相関係数（線形）は0.487であり，正の相関がある。しかし，傾斜角の標準偏差が小さい領域では，必ずしもこの関係に沿わず，曲率の値が大きくなる部分もいくらかみられ，そのような中でもつらら石が発生している場所がいくつかある。また，つらら石数については，傾斜角の標準偏差や曲率の絶対値が大きい領域に多くなる傾向（図4.9, 4.12）は必ずしも明瞭にはあらわれていない。

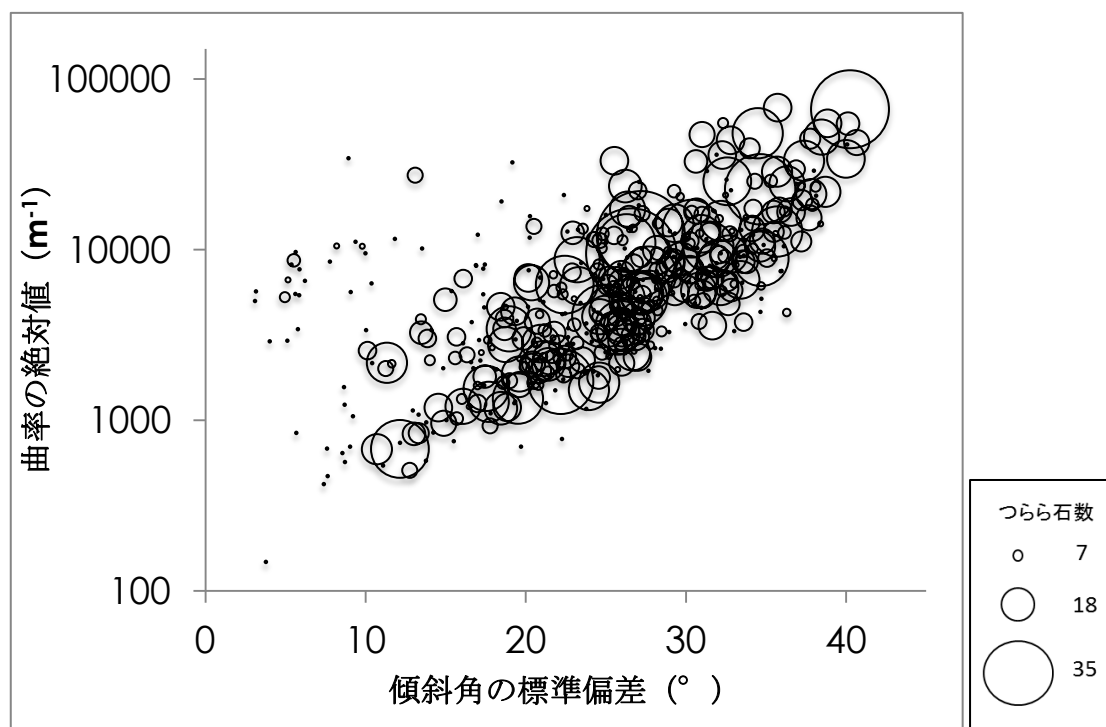


図 4.14. 傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値との関係。プロットのの一つ一つは 1 m グリッドと対応し，その大きさはつらら石数を示す（つらら石数が 0 の部分は黒点で示す）。

つらら石の分布と傾斜角の標準偏差・曲率の絶対値との関係を，エリア (a) (b) (c) の 3つの範囲ごとに調べた結果，つらら石保有セル率と1セルあたりのつらら石数，傾斜角の平均値，傾斜角の標準偏差，曲率の絶対値に差が見られた（図4.14～4.20，表4.4）。エリア (a) では (b) よりもつらら石数が少ないにも関わらず，傾斜角の標準偏差が小さい場所が少なく，(b) とほぼ同じ傾斜角の標準偏差を持つ。また，傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値が大きいほど，つらら石の数が増えるという関係（図4.9, 4.12）が明瞭ではない。エリア (b) では傾斜角の標準偏差や曲率の絶対値が大きい領域につらら石が多くなる傾向（図4.9, 4.12）が明瞭であり，また傾斜角の標準偏差と曲率絶対値とが対応する傾向から外れる地点は傾斜角の標準偏差が小さい領域にわずかにみられる程度である。エリア (c) はつらら石保有セル率と1セルあたりのつらら石数が最も小さいエリアである。傾斜角の標準偏差

が全体的に小さく、また傾斜角の標準偏差や曲率の絶対値が大きい領域につらら石が多くなる傾向（図4.9, 4.12）は明瞭でなく、また傾斜角の標準偏差と曲率絶対値とが対応する傾向から外れる地点も多い。とくに、傾斜角の標準偏差が小さく曲率の大きい領域にも、つらら石がいくつか発生している。

表 4.4 各エリアにおける、1 m グリッドごとのつらら石の数と頻度、および傾斜角平均、傾斜角の標準偏差、曲率絶対値のそれぞれの平均値。

エリア	セル数	つらら石 保有セル数	つらら石保有セ ル率(%)	つらら石数	1セル(1m ²)あたりの つらら石数
a	87	54	62.1	448	5.1
b	210	174	82.9	1313	6.3
c	188	76	40.4	571	3.0
合計	485	304		2332	
平均			61.8		4.8

エリア	傾斜角の 平均値(°)	傾斜角の 標準偏差(°)	曲率の絶対値 (m ⁻¹)
a	44.8	26.6	7859.6
b	41.9	26.3	11162.0
c	44.7	21.8	6233.7
合計			
平均	43.8	24.9	8418.5

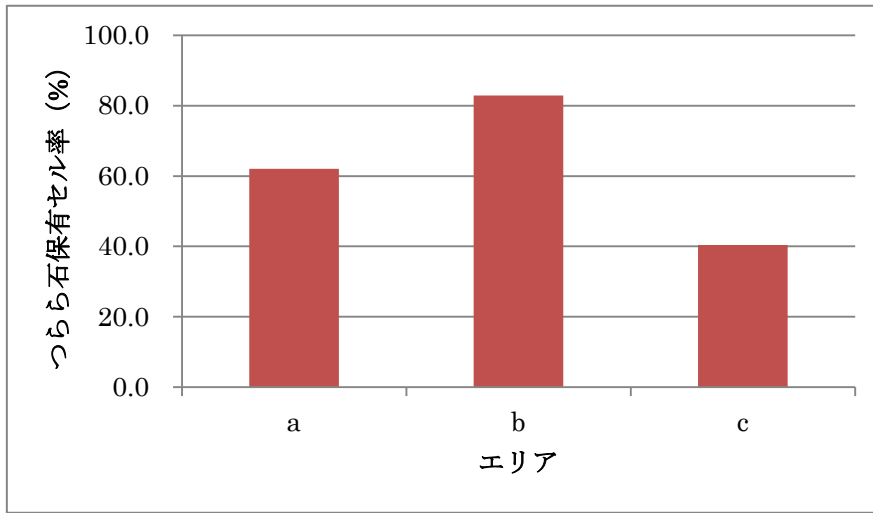


図 4.15. 各エリアにおけるつらら石数保有セル率. エリア (a) (b) (c) は図 4.3 を参照.

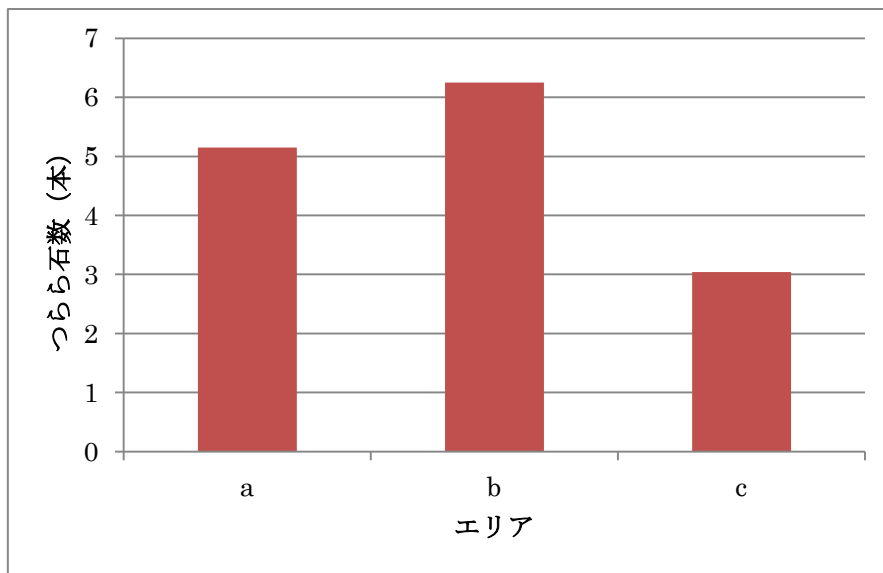


図 4.16. 各エリアにおける 1セルあたりのつらら石数. エリア (a) (b) (c) は図 4.3 を参照.

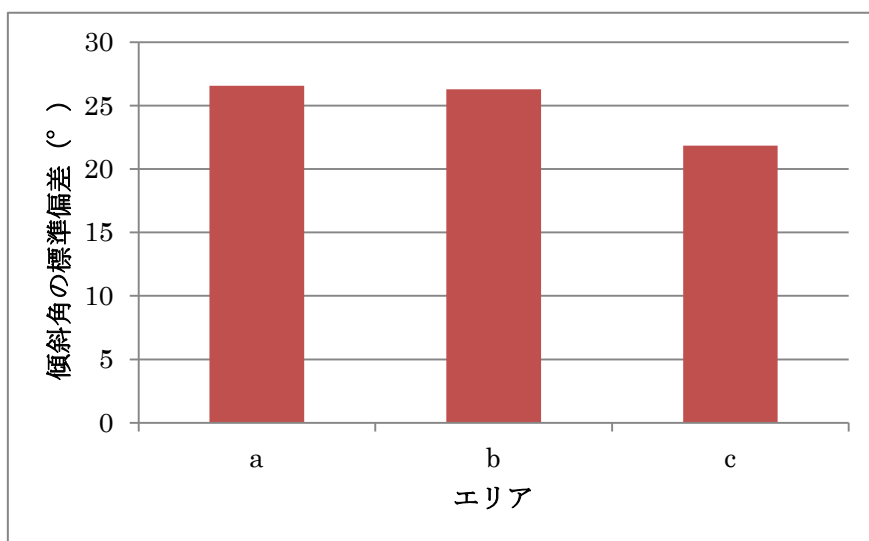


図 4.17. 各エリアにおける傾斜角の標準偏差. エリア (a) (b) (c) は図 4.3 を参照.

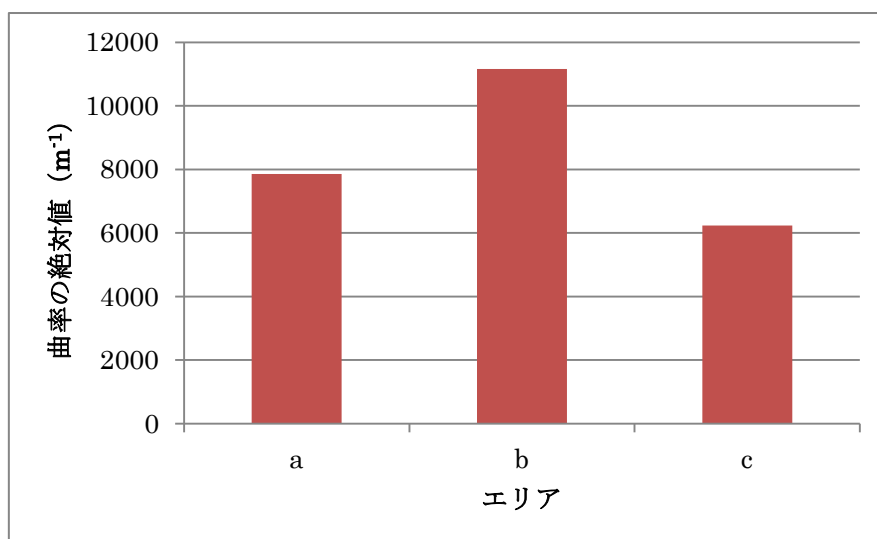


図 4.18. 各エリアにおける曲率の絶対値. エリア (a) (b) (c) は図 4.3 を参照.

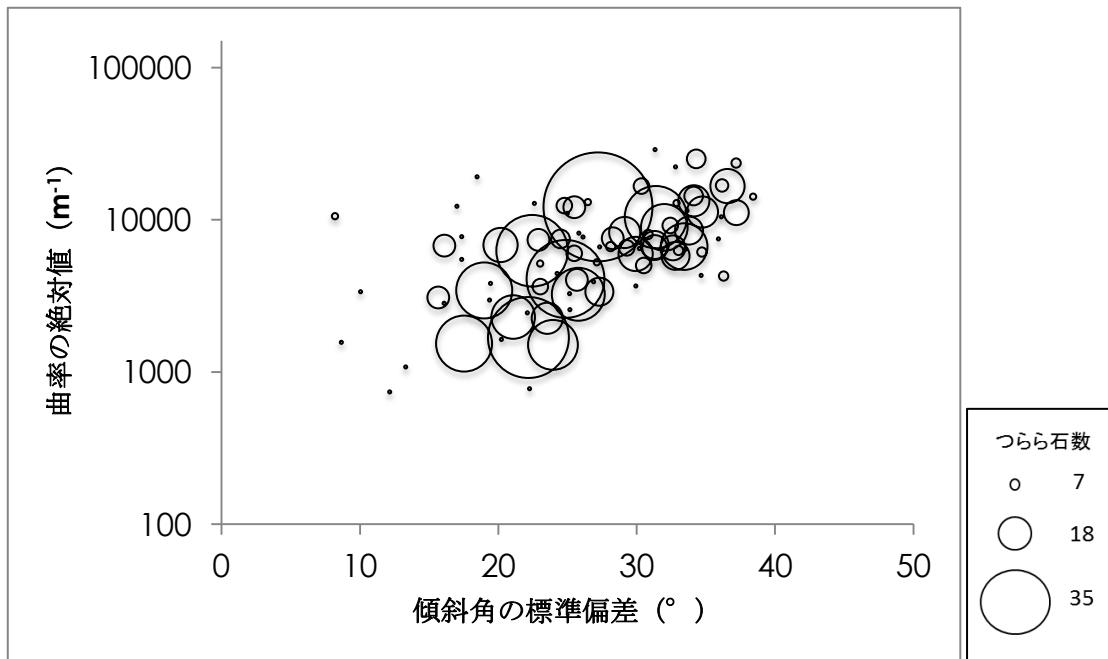


図 4.19. エリア a における傾斜角の標準偏差，曲率の絶対値，およびつらら石の数（円の大きさ）との関係.

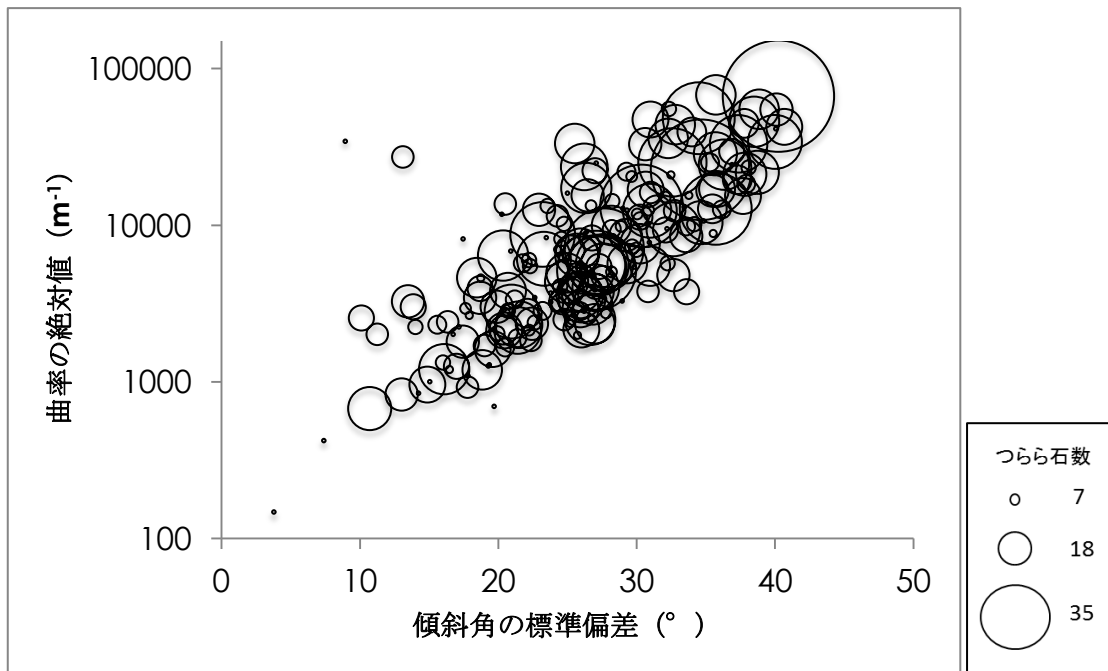


図 4.20. エリア b における傾斜角の標準偏差，曲率の絶対値，およびつらら石の数（円の大きさ）との関係.

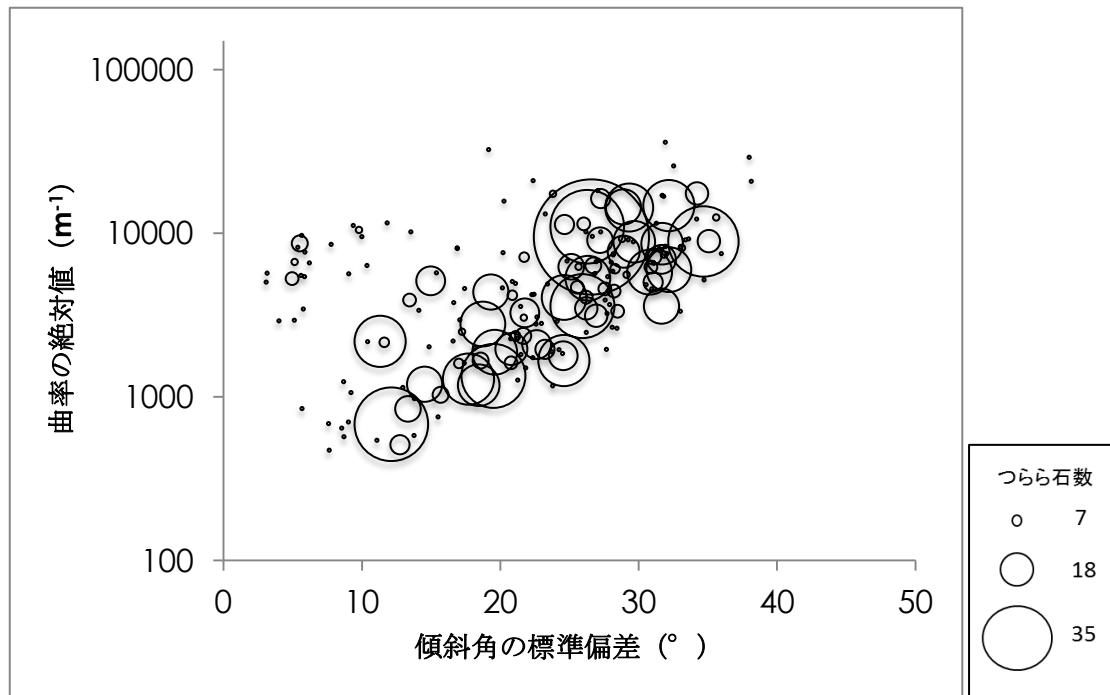


図 4.21. エリア c における傾斜角の標準偏差, 曲率の絶対値, およびつらら石の数 (円の大きさ) との関係.

5. 考察

天井面の傾斜角の平均値とつらら石の分布との関連を調べた結果、 $12^{\circ}\sim 60^{\circ}$ の間でつらら石の発生率が高くなり、一方、傾斜角の標準偏差との関連については、傾斜角の標準偏差が大きくなるほど、つらら石を保有するセルの比率と、1セルあたりのつらら石数が増加する傾向が認められた。つらら石の形成には、そのメカニズムからみて特定の場所に水流が集中することが重要である。傾斜が極端に小さいと、水が集まりにくく、一方で傾斜が極端に大きいと、水が急速に流れたり集中せずに落下してしまうために、つらら石ができにくくなり、中間的な傾斜の場所でつらら石の発達が良いと考えられる。また、傾斜角の標準偏差が大きい場所では、傾斜の細かい変化により水流の速度が低下し、局所的な水流の集中が生じるために、つらら石の発達が良く解釈できる。

曲率の絶対値が大きくなるほど、つらら石保有セル率と1セルあたりのつらら石数が増加する傾向についても、水流との関連で説明できる。すなわち、天井面の湾曲が大きい場所では、水流が特定の場所に集中しやすいと考えられる。ただし、空間自己相関の値からみて、傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値は異なる地形の特徴を表している。すなわち、傾斜角は周囲と似た値をとりやすいが、曲率はランダムに分布する。これは、傾斜角はより大局的な地形の特徴を示し、曲率はより局所的な地形の特徴を示すためと推察される。本研究の結果は、このようなやや異なるスケールの地形の特徴が、共に水流の特徴を規定することを示唆している。

エリア (a) では傾斜角の標準偏差が $20\sim 30^{\circ}$ 、曲率の絶対値が $1000\sim 10000\text{ m}^{-1}$ の場所ですらら石が多く発生している。この場所を調べたところ、図5.1のように周りの標高が高く、水が集まりやすい場所であった。これは上記の考察を支持している。一方、図5.1の円の範囲の写真(図5.2)を見ると、この場所では壁面から直接水が放出されているように見える。岩の表面を流れる水は鍾乳洞では頻繁にみられ、その集中については天井面の地形との関係で議論が可能である。しかし、岩の内部から水が放出される地点については、岩の内部の構造に支配されるため、本研究の手法ではその分布を検討できない。しかし、全体としては天井面の地形とつらら石の分布との間に関係が見られることは、岩の表面を流れる水の寄与が大きいことを示唆している。しかしエリア (a) では、壁面からの水の放出の寄与も大きいため、天井面の地形とつらら石の分布との対応が相対的に弱くなったと考えられる。また、水の放出が局所的に生じるために、全体的につらら石が細長く、先端がとがっているものが多いと推察される。

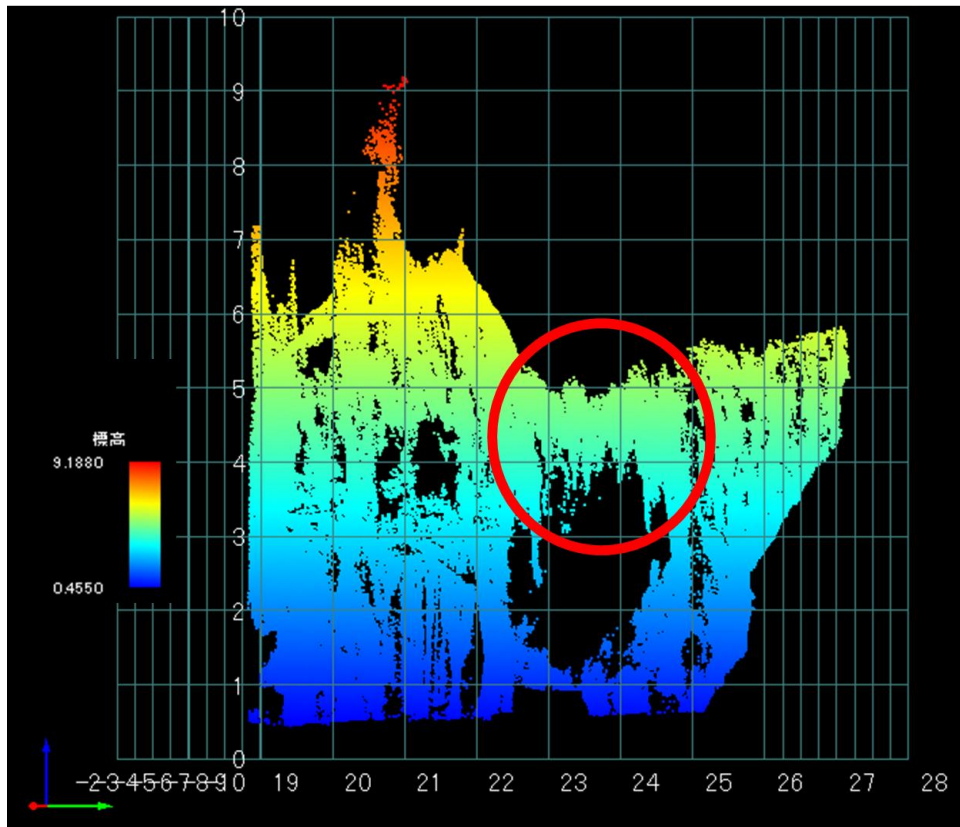


図 5.1. エリア (a) のつらら石が密集している場所 (赤円) の縦断面図.

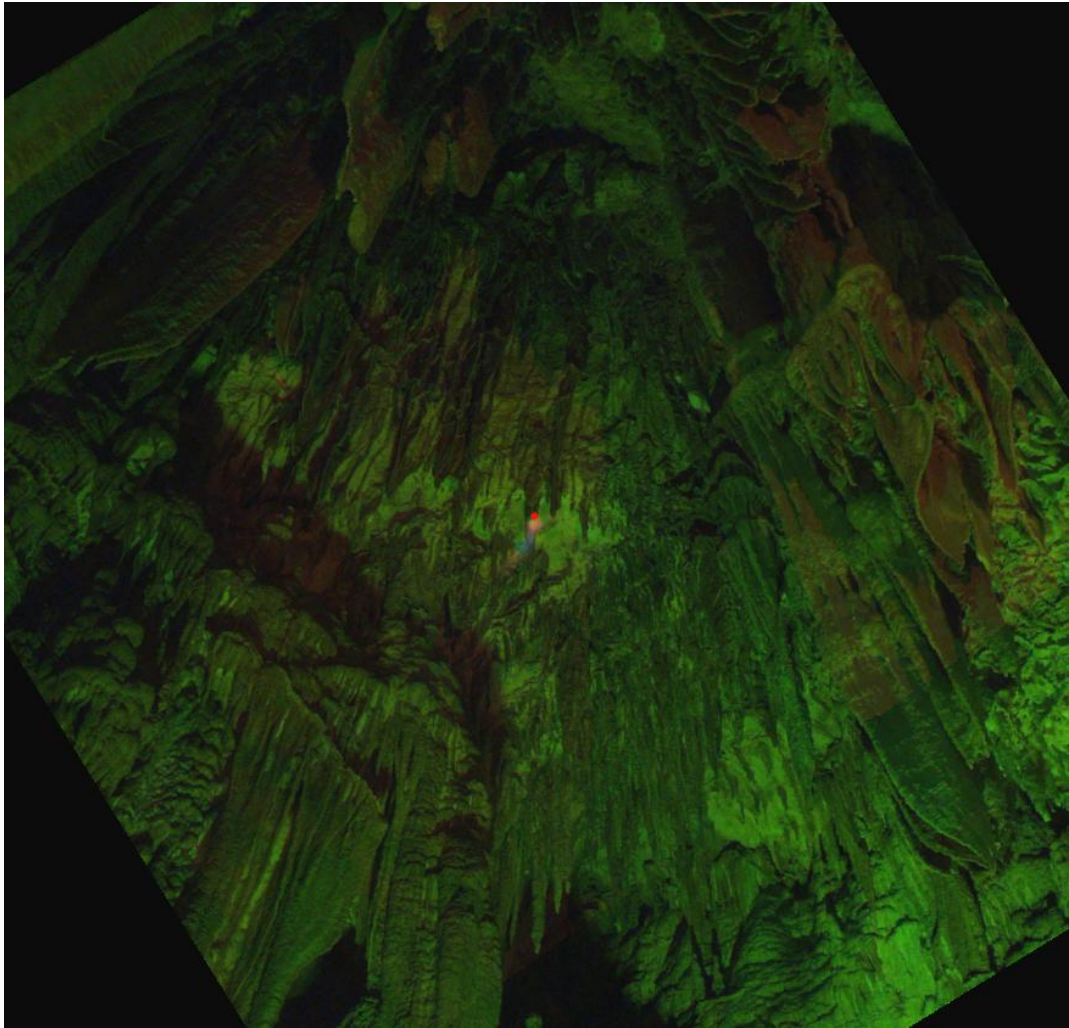


図 5.2. エリア (a) のつらら石が密集している場所 (図 5.1.) の写真.

エリア (b) では、傾斜角の標準偏差と曲率が大きい場所につらら石が発生しやすい傾向が明瞭であり、その傾向から外れる地点は少なかった。これは前記のように表面の水流の速度と集中度が地形に規定されるためと考えられ、調査地域の中心に位置し、つらら石の発生も多いエリア (b) で、このような現象が明瞭なことを意味している。

エリア (c) は、つらら石保有セル率と1セルあたりのつらら石数が最も小さいエリアであり、これは傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値が相対的に小さく、つらら石がしやすい水流の条件が生じにくいためと考えられる。また、傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値とが対応する傾向から外れる地点、すなわち傾斜角の標準偏差が小さく、かつ曲率の比較的大きい領域 (図4.20の左側) についてその分布をみると、図5.3の円で示した傾斜角の平均値が大きい場所に対応する。これは前記した空間自己相関から推定される地形の指標の特徴と関係しており、特に傾斜が大きい場所では地形が単調になり傾斜角は近似する値が連続して分布するが、このような場合でも曲率には微細な地形の相違が反映されることを示唆

する。また図5.4の写真に見られるような、薄く長いカーテン状のつらら石が複数存在したことは、傾斜角の変化が少ないために壁面を伝う水が落下する場所が限られ、長いつらら石が発達しやすくなったと考えられる。

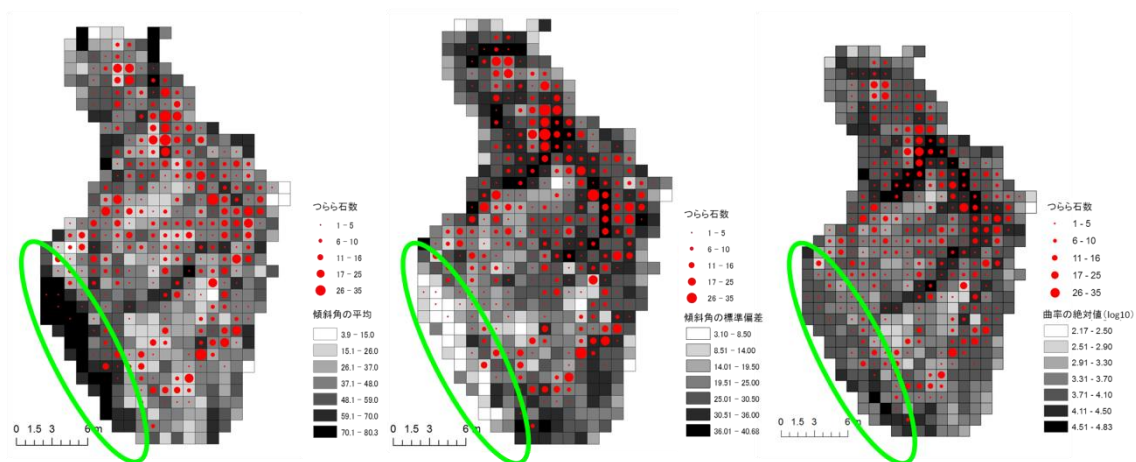


図 5.3. エリア (c) の傾向から外れる地点が多く分布している場所 (緑円).

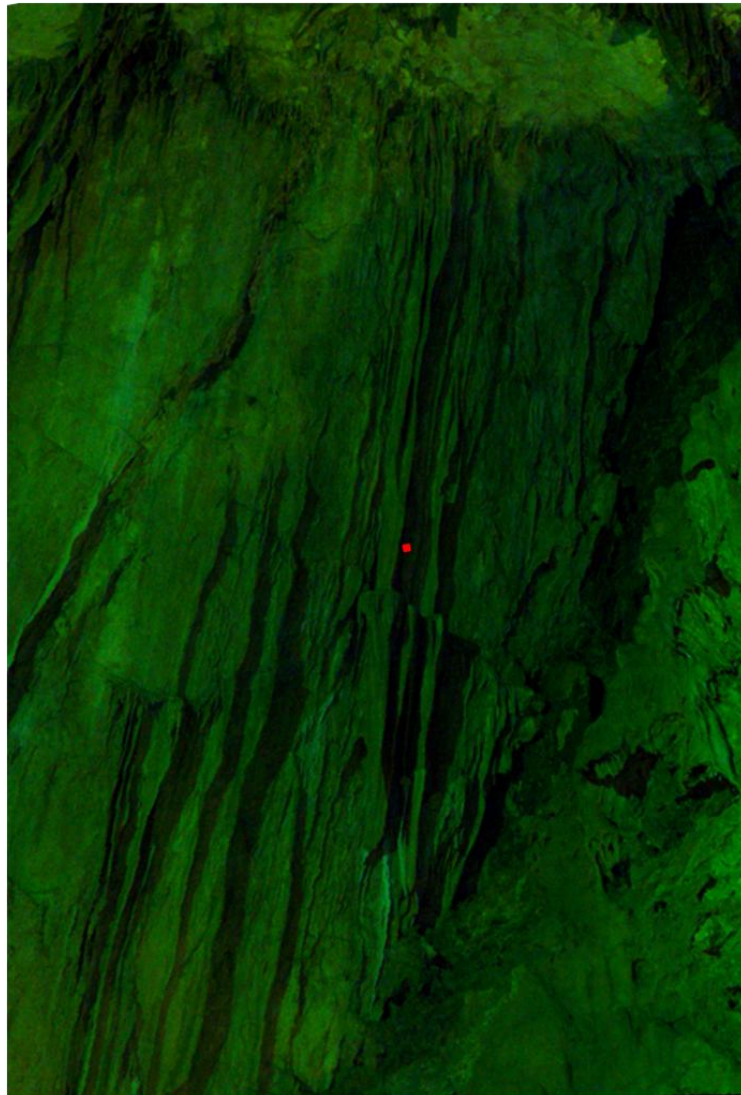


図 5.4. エリア (c) の傾向から外れる地点が多く分布している場所の写真.

本研究により、つらら石が発生しやすい地形要因が従来よりも詳しく明らかとなった。また、3Dレーザースキャナーによる鍾乳石の詳細な測量調査の有効性も示すことができた。従来は少数の鍾乳石を局所的に調べた研究が多かったが、本研究では、3Dスキャナーを用いて4か所で行なった計11回のスキャニングにより、従来では測量が難しかった複雑な天井面の詳しい地形データを得たことにより、広域的に多数の鍾乳石を調べ、地形条件と鍾乳石の発生要因を検討できた。また、本研究では2,328個という多量のつらら石を抽出したが、精度的には約21.5 m先に存在する長さ30 cmのつらら石の確認も可能であったことを示しており（3Dレーザースキャナーのカメラの位置を高さ1.5 mと仮定した場合）、これはフィールドでの目視による調査よりも正確で高速な地形の認定と言える。Kim and Sanderson (2010) の研究では、天井が高すぎるために測量できなかった鍾乳石があったと記述されている。3Dレーザースキャナーでの測量は、こういった問題も解決する。また、鍾乳石に

傷を付けずに測量することが可能であり、地形の保護の点においても優れた研究方法と考えられる。

一方で、3Dレーザースキャナーで得られるデータの容量が極端に大きく、測量に時間がかかりすぎることや、データ処理を行うコンピュータの現状の能力では十分に扱い切れなかったという欠点もある。このため、今回の測量では最大計測密度の適用は避け、解析の際にもポイント数を8分の1に間引いて解析を行った。もし測量の時間とデータの容量の制約が小さければ、今回よりも高密度で高解像度なデータを得ることができるため、より小さな鍾乳石も含めた解析が可能であろう。この点については、今後の3Dレーザースキャナー機材の機能強化や、コンピュータの処理能力の向上に期待される。

6. 結論

本研究では、3D レーザースキャナーを用いて、あぶくま洞における高精細な地形測量を行った。その点群データとラスタデータとから、鍾乳石、とくに天井面におけるつらら石の分布とその地形条件について、GIS を用いて分析を行った。結論は以下のようにまとめられる。

1. 天井面の標高ラスタデータにおいて、傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値との間には正の相関があった。一方、傾斜角ラスタと曲率ラスタの空間自己相関をそれぞれ求めたところ、傾斜角ラスタは正の自己相関があり、曲率ラスタは自己相関なしであった。傾斜角の標準偏差と曲率の絶対値はいずれも地形の凹凸を示す指標と考えられるが、このうち曲率はより細かい地形の特徴を反映していると考えられる。
2. 天井面における傾斜角の平均値とつらら石の分布との比較から、傾斜角が $15^{\circ} \sim 48^{\circ}$ の間でつらら石数が多いことがわかった。傾斜が極端に小さいと、水が集まりにくく、一方で傾斜が極端に大きいと、水が急速に流れたり集中せずに落下してしまうために、つらら石ができにくくなり、中間的な傾斜の場所でつらら石の発達が良いと考えられる。
3. 傾斜角の標準偏差とつらら石の分布には正の相関が認められ、傾斜角の標準偏差が大きくなるほど、つらら石保有セル率と 1 セルあたりのつらら石数が増える。傾斜角の標準偏差が大きい場所では、傾斜の細かい変化により水流の速度が低下し、局所的な水流の集中が生じるために、つらら石の発達が良いと解釈できる。
4. つらら石の分布と天井面の曲率との関係では、曲率の絶対値が大きくなるほど、つらら石保有セル率と 1 セルあたりのつらら石数が増加した。天井面の湾曲が大きい場所では、水流が特定の場所に集中しやすいと考えられる。
5. 天井面を3つの領域に分けて、つらら石の分布と傾斜角の標準偏差・曲率の絶対値との関係を調べた。その結果、(a) 壁面からの水の放出の寄与が大きく、天井面の地形とつらら石の分布との対応が相対的に弱い領域、(b) 表面の水流の速度と集中度が地形に規定され、つらら石の発生も多い領域、および (c) つらら石ができやすい水流の条件が生じにくく、また壁面を伝う水が落下する場所が限られるために長いつらら石が多い領域、とそれぞれの特徴が明らかになった。

以上のように、本研究により、つらら石が発生しやすい地形要因が従来よりも詳しく明らかとなった。また、3D レーザースキャナーによる鍾乳石の詳細な測量調査の有効性も示すことができた。今後は、石筍や、今回の 3D レーザースキャナーでは測量できなかった、小さなつらら石の分布との関連なども調べる必要がある。

謝辞

東京大学の小口高教授には、研究方法や文章の書き方など研究に関する多くの助言をいただいた。また測量調査の手伝いもしてくださった。東京大学の早川裕弉助教にも研究方法や調査機器の使い方など研究に関する多くの助言をいただいた。また、測量調査の手伝いをしていただいた。あぶくま洞管理事務所の方々には、あぶくま洞調査の許可をいただいた。日本洞穴探検協会の菊池正志さんからはあぶくま洞の測量図や調査資料を提供していただいた。東京スペレオクラブの野池耕平さんからは、日本の洞窟に関する資料を提供していただいた。自然環境学専攻の伊藤有加さんには研究に関する助言や、測量調査の手伝いをしていただいた。自然環境学専攻の Dou Jie さんには測量調査の手伝いをしていただいた。自然環境学専攻の石川怜志さんには測量調査の手伝いをしていただいた。これらの人にお礼を申し上げる。

参考文献

あぶくま洞環境保護調査団 (2004) : 平成 16 年度あぶくま洞測量報告書.

Baldini, J.U.L. (2001): Morphologic and Dimensional Linkage Between Recently Deposited Speleothems and Drip Water From Browns Folly Mine, Wiltshire, England. *Journal of Cave and Karst Studies*, 63:83–90.

Bonham-Carter, G.F. (1994): *Geographic information Systems for Geoscientists*. Pergamon, Ottawa, 398 p.

Burrough, P. A. and McDonell, R. A. (1998): *Principles of Geographical Information Systems* (Oxford University Press, New York), 190 p.

電子国土 Web. NEXT : 標準地図. <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse/index.html>, accessed January 9, 2013.

Diego, G-A., Angel, M-N., Javier, G-L., Jesus, H-P. and Gabriel G-A. (2009): 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art. *Sensors*, 9:1108–1127.

橋本雄一 (2012) : GIS と地理空間情報 Arc GIS10 とダウンロードデータの活用. 古今書院, 5p.

Heritage, G. and Large, A. (2009): *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Chichester, Wiley-Blackwell, 288 p.

門林理恵子 (2003) : レーザースキャナと RTK-GPS を用いた遺跡の 3 次元計測. 社団法人情報処理学会 研究報告, 59:73–80.

Kim, Y.-S. and Sanderson, D.J. (2010): Inferred Fluid Flow Through Fault Damage Zones Based on the Observation of Stalactites in Carbonate Caves. *Journal of Structural Geology*, 32:1305–1316.

桑野建・佐々木靖人 (2003) : 地上型スキャン式レーザ測距儀による道路斜面防災 GIS 用 DEM データの作成. *情報地質*, 14 : 311–318.

Moore, I. D., Grayson, R. B., and Landson, A. R. (1991): Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5: 3–30.

日本の地質『東北地方』編集委員会（編）（1989）：日本の地質2 東北地方. 共立出版株式会社, 65p.

小元久仁夫・中村俊夫・森和紀・田中邦一・松田重雄・大八木英夫・安谷屋昭・久貝弥嗣・新城宗史（2011）：宮古島東平安名岬西方，ティダガー（太陽泉）の石灰華段丘地形，堆積物の較正年代および水質分析結果について. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 46 : 25–48.

Postpischl, D., Agostini, S., Forti, P. and Quinif, Y. (1991): Palaeoseismicity from Karst sediments: the “Grotta del Cervo” Cave Case Study. *Tectonophysics*, 193:33–44.

Shan, J. and Toth, C.K. (eds.) (2009): Topographic laser ranging and scanning : principles and processing. Boca Raton, CRC Press, 590 p.

トプコン：3次元レーザースキャナーGLS-1500.
<http://www.topcon.co.jp/positioning/products/product/3dscanner/gls1500.html>, accessed January 14, 2013.

Trent & Peak Archaeology: Nottingham Caves Survey - About the Project.
<http://nottinghamcavessurvey.org.uk/about.htm>, accessed January 14, 2013.

漆原和子・鹿島愛彦（1996）：日本の石灰岩の分布とその地質時代. 漆原和子編 「カルスト その環境と人びとのかかわり」. 大明堂, 102 p.

漆原和子（1996a）：鍾乳洞の形成とその発達. 漆原和子編 「カルスト その環境と人びとのかかわり」. 大明堂, 113 p.

漆原和子（1996b）：福島県，入水鍾乳洞におけるスカラップの形成. 駒沢地理, 32:55–67.

漆原和子（1998）：福島県あぶくま洞付近の大理石地域と非石灰岩地域における土壌中の二酸化炭素濃度. 駒沢地理, 34:35–46.

漆原和子（1999）：観光鍾乳洞における気候特性—福島県あぶくま洞を例として—。季刊地理学, 51:188–200.

Viero, A., Teza, G., Massironi, M., Jaboyedoff, M., and Galgaro, A. (2010): Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: The Cinque Torri case (North-Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 122: 191–204.

Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.-C. and Dorale, J.A. (2001): A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *SCIENCE*, 294:2345–2348.