

2004年度 卒業論文

リアルタイム 3DCG における  
鍾乳石自動生成手法に関する研究

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 3DCG コンポーネントプロジェクト

学籍番号 M0101209

鈴木 大祐

2004年度 卒業論文概要

論文題目

リアルタイム 3DCG における  
鍾乳石自動生成手法に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0101209

氏名

鈴木 大祐

指導  
教員

渡辺 大地講師

キーワード

鍾乳石、つらら石、石筍、石柱、モデリング

近年、様々なコンテンツに使用されるCGは実写と区別がつかないほどである。それほどリアルに描写出来るようになった理由の一つに、数多くの手法が自然物ごとに研究され洗練されているということがある。本研究では、自然物の一つである鍾乳石をよりリアルに描画するための手法を提案する。

既存の鍾乳石の手法では、鍾乳石の種類に応じた特徴が考慮されていなかった。そこで本研究では代表的な鍾乳石である、つらら石・石筍・石柱の種類に応じた特徴を考慮した鍾乳石を実現する。オブジェクトの基盤は四角形のポリゴンが多数ある多角柱のオブジェクトで、その頂点に変位することで形状を生成する。また、頂点座標値が一定の範囲内で変化することにより不規則性を実現する。つらら石の形状の特徴は、円筒状の先端部分、滑らかな凹凸面、前後左右のゆがみである。それらの特徴をオブジェクトの半径を一定にし、 $\sin$ 関数や乱数を用いたベクトルを利用することにより実現した。石筍の形状の特徴は、岩肌のような表面、それに覆いかぶさる滑らかなこぶである。それらの特徴をオブジェクトの全ての頂点を乱数でずらし、Bezier自由曲線を利用することにより実現した。石柱の形状の特徴は、上部はつらら石が数多く融合し、下部は石筍が数多く融合し成長したものである。それらの特徴をつらら石オブジェクトと石筍オブジェクトをフラクタル図形のシルピンスキーのギャスケットを利用し複数配置することにより実現した。最後にこれらの鍾乳石オブジェクトを複数個生成し、本研究の独自性、問題点について言及する。

# 目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	論文構成	2
第2章	鍾乳石とは	3
2.1	鍾乳洞について	3
2.2	鍾乳石について	4
2.3	本研究で形状生成を行う鍾乳石	5
2.3.1	つらら石	5
2.3.2	石筍	6
2.3.3	石柱	7
第3章	鍾乳石形状の生成	9
3.1	基礎オブジェクト	9
3.2	つらら石形状の生成	10
3.3	石筍形状の生成	14
3.4	石柱形状の生成	21
第4章	結果と考察	25
4.1	結果	25
4.2	考察	28
第5章	まとめ	30
	謝辞	31
	参考文献	32

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 はじめに

近年のコンピュータ技術の発展に伴い、映画やゲーム・景観シミュレーションを始めとする様々なコンテンツに CG が、使用され需要が増えている。CG を使用するコンテンツ内における実物のリアリティが向上するためには、それらと同じ形状をモデリングする必要がある。しかし、CG での表現においては、複雑な構造の自然物をリアルに再現するオブジェクトを用意しようとする、長い制作時間と多大な労力が必要となる。そこで、リアルなオブジェクトを容易に制作するために、自然物ごとに様々な手法が提案されている [1]。しかし、特殊な形状を持つ自然物をリアルに再現するオブジェクトの作成については、まだ確立した手法が存在しない場合がある。その場合、長い制作時間と多大な労力を費やしモデラーでモデリングせざるを得ない。

本研究では確立した手法が存在しない自然物の一つである鍾乳石に着目した。鍾乳石の生成に関する研究は、生成する形状そのものよりも、現実の生成過程を模倣、解析することを目的とした研究が多い [2][3][4][5]。CG 表現で利用することを念頭においた研究としては、Bala らが提案した液体の沈殿に基いて鍾乳石を生成する手法がある [6]。Bala らの手法で生成されたオブジェクトの表面は、鍾乳石の種類によらず同一である。しかし、実際の鍾乳石の表面は種類によって形状が異なる。鍾乳石の種類ごとに全く違う表面の形状を持つ手法は未だに存在しない。よっ

て、短時間で鍾乳石の形状を再現するためには、逆円錐等簡易なオブジェクトを多数配置したり、山肌をはじめとする他の複雑な構造の自然物をコンピュータ上で表現するための技法を代用して、リアリティに欠けるオブジェクトを生成せざるを得ない。

そこで本研究では短時間かつ容易にリアリティのある鍾乳石をモデリングする手法を提案する。リアリティのある鍾乳石の形状を生成するために、形状の特徴を種類によって分ける。その特徴を表現できる手法を利用することにより、オブジェクトの頂点の変位し形状を生成する。また、頂点座標値が一定の範囲内で変化することにより、同じ種類の鍾乳石でも形状が不規則性を増す。それによって鍾乳石という複雑な構造の物体をCGでリアルかつ容易に再現出来るようになる。

## 1.2 論文構成

本論文では第2章で実際の鍾乳石の種類とその生成方法や鍾乳洞との関連について述べ、さらに本研究で使用する鍾乳石について実際の生成順に述べる。特に、本研究は形状の研究のため鍾乳石の形状をいくつかの特徴に分けて述べる。第3章では第2章であげた鍾乳石を本論文ではどのようなフィールドでどのような手法で形状生成をしたのか、それぞれの鍾乳石について述べる。第4章では、第3章で一つずつあげた鍾乳石を一つにまとめ全体景観として配置し考察を行う。第5章で今後の課題・展望について述べ、結論をまとめる。

## 第 2 章

# 鍾乳石とは

### 2.1 鍾乳洞について

鍾乳石とは鍾乳洞内でしか生成されない石である。したがって、鍾乳洞は鍾乳石を研究する上で非常に重要である [7]。

鍾乳洞は地中の石灰岩を酸性の水が溶かしたすことによって生成が始まる。酸性の水は、雨水が腐葉土を通って行くうちに酸性度を増したものである。それが岩の小さな割れ目や断層に沿ってしみ込むことで、石灰岩が融解し炭酸水素カルシウムとして流れ出し、空洞を生成する。この空洞化の現象を溶食現象という。その後、空洞が外界にまで及ぶと空気が空洞の中に流れ込み、地下水に溶け込んでいた炭酸水素カルシウムが、流れ込んだ空気の圧力に押され、二酸化炭素を放出しながら固形となる。このようにして再度固体となったものや、溶食時に溶食されずに残ったものが鍾乳石である [8]。厳密に言えば溶食現象時に溶食されずに残ったものも鍾乳石である。図 2.1 は様々な鍾乳石が結合し、複雑で幻想的な空間である鍾乳洞の一部である [7]。



図 2.1: 鍾乳洞

”よかところBY・写真満載九州観光”<http://www.yado.co.jp/>

## 2.2 鍾乳石について

鍾乳石は炭酸カルシウムが液体から固体へ凝固して出来る生成物である。その生成速度は100年に1cmほどで、実際に生成される様子を見ることは難しい。その極度に遅い生成速度、成分濃度、不純物の多寡、流出量の多少、気温、湿度、気流、成分の配布とそれら全ての条件が時間の経過により変化することを理由として、現在でも物理・化学の見地から何故そのような形状をとるのか解明されていない点がある [3][5][9][10]。

鍾乳石は、その成因や生成する場所、形状によって様々な名称をとり、種々の基

準で分類される [10]。

## 2.3 本研究で形状生成を行う鍾乳石

本研究では、鍾乳石の中でも最も代表的な石であるつらら石、石筍、石柱の三つ [3][11] を研究対象とする。特につらら石は、単に鍾乳石と言った際につらら石のみをさす場合があるほど代表的な鍾乳石である [10]。

### 2.3.1 つらら石

鍾乳洞の天井から鍾乳石の主成分が溶け出て、その高粘性と表面張力から下に滴り落ちるまでに凝固し生成されるのがつらら石である。直下に向かって成長し、氷柱のような形状をとる。生成プロセスは、まずストローのように一定の半径で細長く中心は空洞になっている形状をとる。その形状をとっている鍾乳石は鍾乳管又はストロー石という。その鍾乳管から次第に太くなり生成されるのがつらら石である。また、鍾乳管の名残として、中心に小さな穴があったり、先端部分が一定の太さになっていることがある [7]。

形状の特徴は、氷柱に似ており、周囲にリング状の凹凸模様が発達していることである。氷柱の場合、その凹凸模様の周期は縦方向にほぼ 1cm で一様である [4]。一方つらら石場合、成分の濃度が時間経過につれて変わること、形成されるまでの大幅な時間のずれがあることなどの理由により、凹凸模様は不安定になり周期は存在しない。さらにほぼ無風状態で生成した場合であっても、真っ直ぐ下に成長することはなく、成長方向が前後左右にずれることもある。下にいくほど、成分の液体に加速度がついていくため、そのゆがみが少なくなっていく。つらら石の形状の特徴は、鍾乳管の名残である部分、リング状の滑らかな凹凸面、前後左右のゆがみの 3 つである。また、例外的な形状の特徴としてリング状の模様から別の石が派生しているものがある。図 2.2 はストロー石の名残があるつらら石群である [7]。



図 2.2: つらら石

”洞窟の科学” <http://www.doukutu.co.jp/sc-contents.html>

### 2.3.2 石筍

主成分が直下に落ちて沈殿し生成されるのが石筍である。基本的に天井に向かって生成し、つらら石の次に生成される数が多い。成分が付着している時間がつらら石の成長の場合よりも長いため、石筍はつらら石よりも大きいものが多い [10]。また、滴下の際に成分が飛び散るため、非常に複雑な形状を取りやすい。

形状の特徴は、つらら石同様前後左右のゆがみ、多数の石が複雑に結合し合っている岩肌のような表面、それを繋ぐように覆いかぶさっている滑らかなこぶの3つである。基本的には上部ほど滑らかで、下に行くほど岩肌のような表面の凹凸が突出し複雑になっている。また、その凹凸には法則性がなく突出している長さは短い。年数を追うごとに岩肌のような表面から滑らかな表面に全体的になりつつ、大きくなるのが一般的である。また、例外的な形状の特徴として多頭型のものや頂部に凹みがあるものがある [12]。図 2.3は生成時間が短い石筍である [13]。



図 2.3: 石筍

”神仙峡” <http://khunter.edap.jp/index.html>

### 2.3.3 石柱

つらら石と石筍が互いに長く成長し、結合したものが石柱である。他の二つの石とは生成するためにかかる月日が異なり、非常に長いため三つの中では一番現存数が少ない。

形状の特徴は、上半分はつらら石の名残が、下半分は石筍の名残が色濃く出ている。いずれも大きく成長した上で結合していることにより、その表面は滑らかであることが多い。また、石柱が出来るほど成長したつらら石や石筍は、単体の鍾乳石だけではなく、周りのつらら石や石筍をいくつも結合して生成している場

合が多々ある。結合している場合は下にいくほど石筍の名残があり、複雑である。石柱の形状の特徴は、つらら石と石筍の二面性、複数の鍾乳石の結合、下部ほど複雑の3つである。図 2.4は非常に綺麗に出来た石柱である [14]。

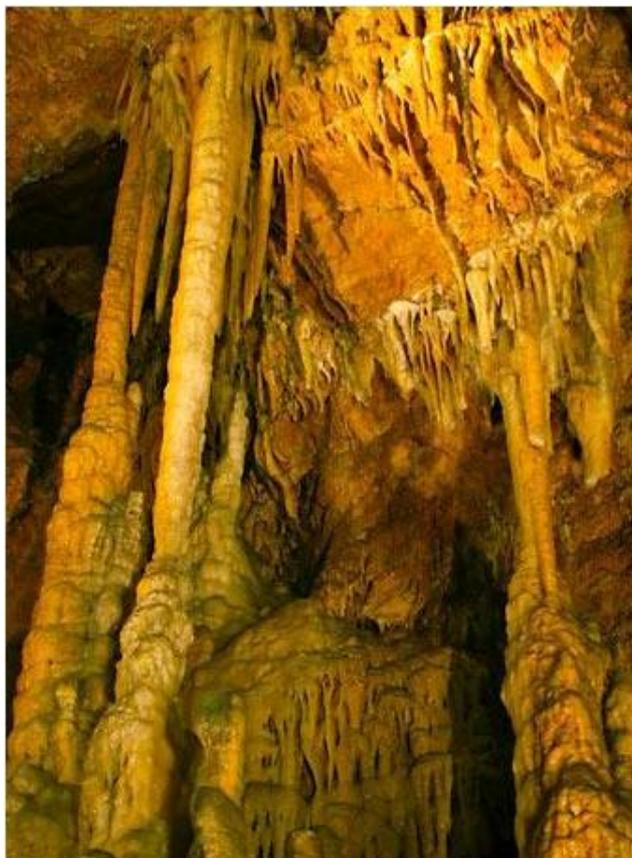


図 2.4: 石柱

”あじこじ九州” <http://www.ajkj.jp/>

## 第 3 章

# 鍾乳石形状の生成

### 3.1 基礎オブジェクト

本研究で扱うフィールドでは、三次元空間上の横方向を  $x$  軸、鉛直方向を  $z$  軸、奥行きを  $y$  軸とする。その  $xy$  平面状に正  $n$  角形を作り、それを  $z$  軸方向に伸ばすことで正  $n$  角柱を作り、これを基礎オブジェクトとする。また、正  $n$  角柱の  $z$  軸に平行な  $n$  本の辺それぞれについて、一辺あたり  $m$  個の頂点を等間隔に設定する。つまり基礎オブジェクトの総頂点数は  $n(m+2)$  個になる。 $n$  と  $m$  は任意の整数である。総頂点数を増減することにより必要に応じた精度で形状を生成できる。

また、正  $n$  角柱の高さの  $1/(m+1)$  を  $j$  とし、正  $n$  角形の外接円の半径を  $r$  とする。さらに  $z$  成分が同一の  $(m+2)$  個の頂点の組を列とし、 $x$  成分と  $y$  成分が共に同一の  $n$  個の頂点の組を行とする。基礎オブジェクトにおいて、列は  $n$  列、行は  $(m+2)$  行存在する。また、 $z$  成分が一番大きい行を番号 1 とし、 $z$  成分について大きい順に  $(m+2)$  行目まで行番号を設定する。図 3.1 は行数 5, 列数 10, 頂点数 50 の基礎オブジェクトである。

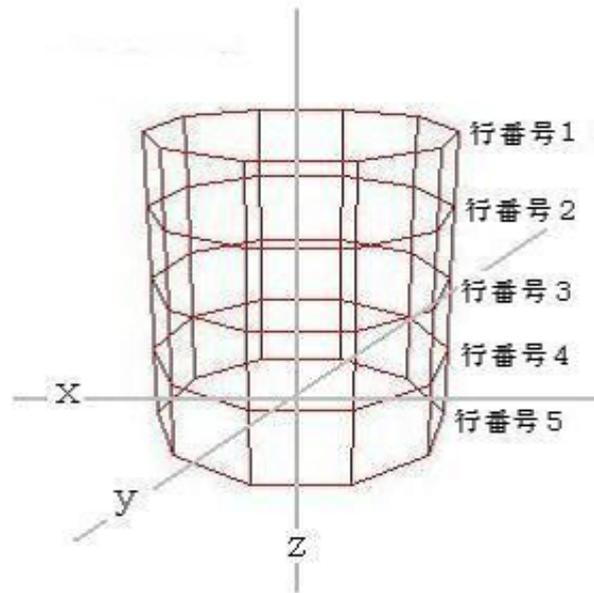


図 3.1: 10 角柱の基礎オブジェクト

## 3.2 つらら石形状の生成

つらら石形状の生成過程は 4 つの段階で構成する。まず基礎オブジェクトを逆円錐に変形する段階、円筒状の先端部分がある逆円錐形に変形する段階、そしてつらら石特有の滑らかな凹凸模様を加える段階、最後に前後左右のゆがみを加える段階である。

まず最初の工程の逆円錐の形成について述べる。逆円錐は基礎オブジェクトの半径を高さに合わせて変えることで生成出来る。変化の仕方は、行番号が増すごとに  $r_h$  から  $r/m$  だけ引いて小さくしていく。その半径の変化によって基礎オブジェクトを逆円錐に変形することができる。

次に円筒状の先端部分の形成について述べる。この変形は基礎オブジェクトの半径の変化だけで実現できる。行番号  $h$  がある値  $a$  以上になると半径を一定の値  $s$  にすることで実現した。以上の工程によって決定した  $r_h$  を (3.1) 式で表す。図 3.2は

ここまでの変化を  $n = 10, m = 10$  の基礎オブジェクトに組み込んだものである

$$r_h = \begin{cases} s + \frac{r(h-a)}{m} & (h < a) \\ s & (h \geq a) \end{cases} \quad (3.1)$$

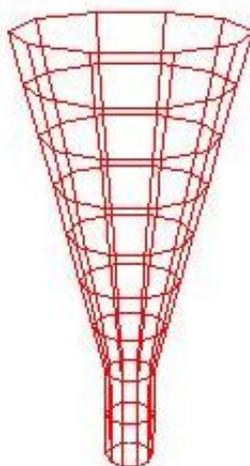


図 3.2: 円筒状部分のある逆円錐オブジェクト

次に、氷柱のように滑らかな凹凸模様のある表面の生成について述べる。凹凸模様は、鉛直方向に半径が波うっているような模様である。その模様と似ている三角関数の  $\sin$  関数を利用する。 $\sin$  波の振幅と周期を変えることで、様々な凹凸模様が表現出来る。 $c$  を設定することにより  $\sin$  波の振幅が変わり凹凸模様の突出する長さが変化する。 $d$  を設定することにより  $\sin$  波の周期が変わり凹凸模様の凹凸数とその間隔が変化する。行ごとの半径  $R_h$  を (3.1) 式の拡張である (3.2) 式で実現する。凹凸模様の突出する長さ、凹凸の間隔は共に一本のつらら石の中で不規則に変化するため、行ごとに乱数を加えることにより  $c, d$  の値をわずかに変え、それを表現する。つまり、行ごとに値が変化するため  $c, d$  はそれぞれ  $c_h, d_h$  となる。このときの乱数の範囲は、 $c$  に加える乱数ならば  $c$  未満、 $d$  に加える乱数ならば  $d$

未満である。図 3.3は半径の変化を  $n = 10, m = 20$  の基礎オブジェクトに組み込んだものである。

$$R_h = c_h \sin\left(\frac{h}{d_h}\right) + r_h \quad (h < a) \quad (3.2)$$

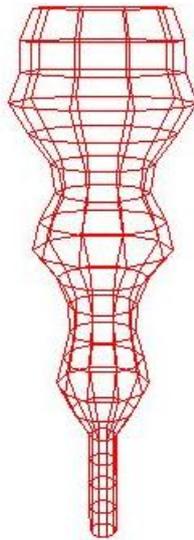


図 3.3: 半径が sin 変化のオブジェクト

次に、前後左右のゆがみの形成について述べる。前後左右のゆがみは、 $h$  行目の頂点全てが  $xy$  平面上で平行移動することで実現する。 $x, y$  成分がそれぞれが乱数であるベクトル  $\mathbf{K}$  を作る。ただし、このベクトル  $\mathbf{K}$  の  $z$  成分は一定で 0 である。この  $\mathbf{K}$  は行ごとに値を変えるため  $\mathbf{K}_h$  となり、それを行番号が同じ頂点全てに加える。

このとき、行ごとに単純に  $\mathbf{K}_h$  を足すだけだと、右に大きくずれたのにすぐに左に大きくずれる部分等が発生し不自然になる。そこで、前の行の頂点に与えた変位量を利用する。一度  $h-1$  行の頂点に与えた変位量を  $h$  行の頂点に与え、その上で  $\mathbf{K}_h$  を加算する。ここで  $h$  行の変位量を  $\mathbf{V}_h$  とし、 $\mathbf{V}_h$  と  $\mathbf{K}_h$  の関係を (3.3) 式で示す。また、2.3.1 で述べた下部にいくほどゆがみが減少する現象を、行番号が小さくなるにいくにつれて、ずれる範囲を縮小することで表現した。ずれる範囲を縮小するために、定数  $k$  を設定した。

$$\mathbf{V}_h = \begin{cases} \mathbf{K}_h & (h = 0) \\ \mathbf{V}_{h-1} + \frac{k \cdot \mathbf{K}_h}{h} & (h > 0) \end{cases} \quad (3.3)$$

図 3.4 は (3.3) 式でゆがみを表現した  $n = 10, m = 20$  の基礎オブジェクトである。

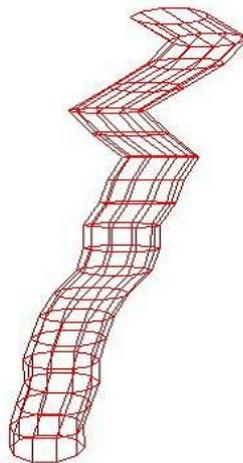


図 3.4: 行ごとにゆがんだ基礎オブジェクト

### 3.3 石筍形状の生成

石筍形状の生成過程は3つの段階で構成する。その順番は、つらら石オブジェクトを石筍オブジェクトの基盤に変形する段階、石筍特有の岩肌のような複雑な表面形状を形成する段階、それに覆い被さるようにあるこぶを形成する段階の順である。

まず、最初の段階のつらら石オブジェクトを石筍オブジェクトの基盤に変形する工程について述べる。つらら石オブジェクトの凹凸模様の突出する長さを  $c_h$  の値を小さくすることで短くし、ストロー石の名残である先端部分を  $a$  の値を0にすることでなくし、さらに上下を逆転する。図3.5は、その段階の石筍オブジェクトである。

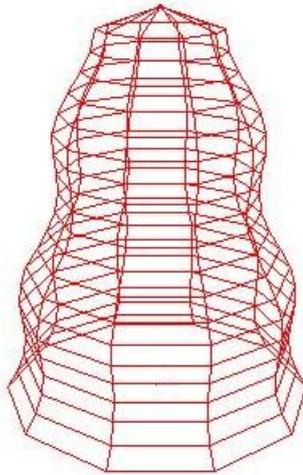


図 3.5: 石筍オブジェクトの基盤

次に、オブジェクトの表面を岩肌のような複雑な形状に変形する工程について述べる。2.3.1で述べた岩肌のような凹凸は乱数を全ての頂点の  $x$  成分、 $y$  成分、 $z$  成分に加えることで、石筍特有の岩肌のような表面を形成する。図3.6は、その段階の石筍オブジェクトである。

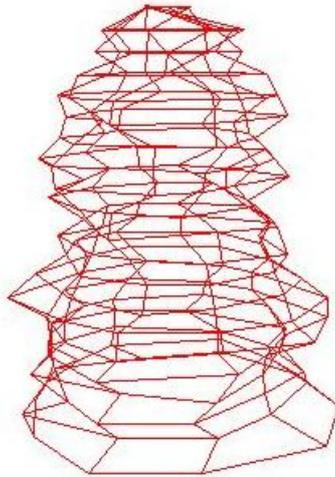


図 3.6: 乱数を加えた石筍オブジェクトの基盤

最後に、岩肌のような表面に覆いかぶさるように存在する滑らかなこぶの形成について述べる。こぶの形成は、石筍オブジェクトとは別にこぶオブジェクトを作ることによって実現する。

こぶオブジェクトは基礎オブジェクトを縦に分割し、その半分だけを利用する。また、行数は石筍オブジェクトと同数とする。図 3.7は、行数 5、列数 5 のこぶのベースとなるオブジェクトである。

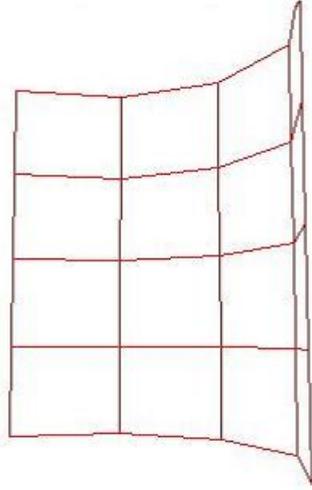


図 3.7: こぶのベースとなるオブジェクト

このオブジェクト変形して滑らかなこぶを形成する。本研究では、こぶ特有の滑らかな曲面を表現するために Bezier 自由曲線 [15][16] を利用した。

Bezier 自由曲線とは、任意の数の制御点と呼ばれる位置ベクトルに基づく、自由曲線の種類である。制御点は最初の点と最後の点を end point と呼び、それ以外の点を control point と呼ぶ。また (3.4) 式は Bezier 自由曲線を与える式である。このとき、 $P_i$  は  $P_i$  の位置ベクトルを指す。

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_i^n(t) \quad (3.4)$$

また、このときの  $B_i^n(t)$  は (3.5) 式である。

$$B_i^n(t) = t^i (1-t)^{n-i} \cdot \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (3.5)$$

この  $t$  の値が  $0 \sim 1$  の間で変化することで点  $P(t)$  が連続に変化する。その  $P(t)$  の軌跡が Bezier 自由曲線である。また、 $t=0$  のとき始点を表し、 $t=1$  のとき終点を表す。図 3.8 は 3 次 Bezier 自由曲線を図示したものである。このとき、 $P_0$  と  $P_3$  が end point を  $P_1$  と  $P_2$  が control point を示している。

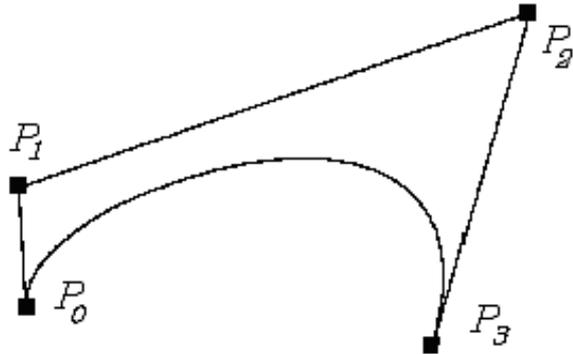


図 3.8: 3 次 Bezier 自由曲線

こぶオブジェクトの縦である列ごと、横である行ごとの頂点をそれぞれの Bezier 自由曲線上にする。また、本研究では Bezier 自由曲線は、7 つの制御点をとる 6 次 Bezier 自由曲線を使用する。

まず、縦方向の平滑化手順に述べる。

1. 石筍オブジェクトの  $u$  列目の頂点を等間隔に 7 つ抽出する。図 3.9 に 7 つの頂点の位置関係を示す。

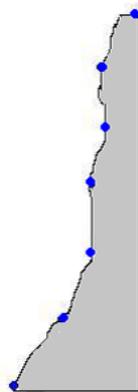


図 3.9: 石筍オブジェクトの断面図

2. その7点を上から順に制御点として Bezier 自由曲線を描く。図 3.10 に制御点と Bezier 自由曲線を示す。



図 3.10: 制御点と Bezier 自由曲線

3. その Bezier 自由曲線上に、頂点を生成する。それら頂点の  $z$  成分は、行番号が同じの石筈オブジェクトの頂点と同一である。図 3.11 に Bezier 自由曲線上に生成したこぶオブジェクトの同列番号の頂点を示す。



図 3.11: こぶオブジェクトの断面図

次に、横方向の平滑化手順を以下に述べる。

1. 縦方向の平滑化後の頂点を  $P_1$  とし、平滑化していない石筍オブジェクトの同じ行番号の頂点  $P_0, P_2$  を 2 点選択する。また、 $P_0$  から  $P_3$  を選択する。その選択方法を、 $P_n$  の列番号を  $U_n$  とし、 $U_n$  の条件を下記を明記することで述べる。 $U_n$  の条件は、 $(u/4) < U_0 < u$ 、 $u < U_2 < (7u/4)$ 、 $U_3 = U_0 + (n/2)$  である。図 3.12 に  $P_0, P_1, P_2, P_3, T$  の位置関係を示す。

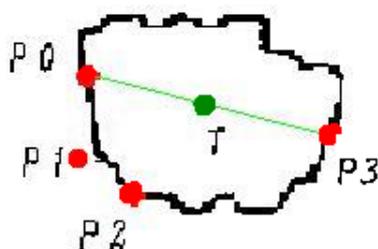


図 3.12: 石筍オブジェクト断面図と  $P_0, P_1, P_2, T$

2. 7つの制御点をとるために  $P_n$  を中点にもち、 $T$  を端点とする線分を考え、もう一方の端点を  $P'_n$  とする。 $P'_n$  は (3.6) 式で与えられる。このとき、 $P_i$  は  $P_i$  の位置ベクトルを指し、 $P'_i$  は  $P'_i$  の位置ベクトルを指し、 $T$  は  $T$  の位置ベクトルを指す。また  $i$  は  $0 \sim 2$  の値である。図 3.13 に  $P'_0, P'_1, P'_2$  の位置関係を示す。さらに  $P_0, P_1, P'_0, P'_1, P'_2, P_1, P_2$  の順に制御点を取り、Bezier 自由曲線を描く。図 3.14 に制御点と Bezier 自由曲線を示す。

$$P'_i = 2P_i - T \quad (3.6)$$

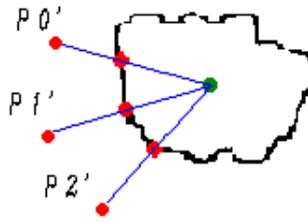


図 3.13: 石筍オブジェクト断面図と  $P'_0, P'_1, P'_2$

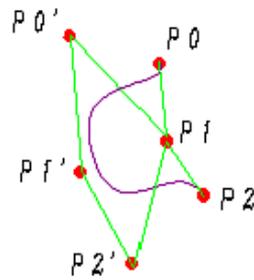


図 3.14: 制御点と Bezier 自由曲線

- 描いた Bezier 自由曲線上にこぶオブジェクトの列数に応じた頂点をパラメータ  $t$  について等間隔に生成する。図 3.15 に Bezier 自由曲線上に生成したこぶオブジェクトの同行番号の頂点を示す。

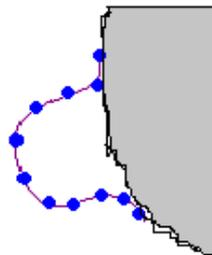


図 3.15: 石筍オブジェクトとこぶオブジェクトの断面図

- 以上の工程を全ての行について行う。

図 3.16にこぶオブジェクトの例を示す。

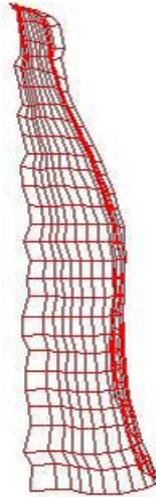


図 3.16: こぶオブジェクト

### 3.4 石柱形状の生成

石柱は 2.3.1 で述べたように、成長期間の長いつらら石と石筍が多数結合した石である。そこで本研究では、上には高さの違うつらら石のオブジェクトを多数配置し、下には高さの違う石筍のオブジェクトを多数配置する。それぞれの配置は、オブジェクトがしっかりと重なるように  $xy$  平面上は規則正しくする必要がある。一方、オブジェクトの高さである  $z$  成分は、より自然に見せるために不規則にする必要がある。つまり、オブジェクトの先端の座標値は  $xy$  平面においては規則的で  $z$  成分においては不規則である。さらに、つらら石のオブジェクトと石筍のオブジェクトがしっかりと噛み合い石柱になるように、その座標値を  $xy$  平面に関して鏡映し、それぞれの石の数だけ先端の座標値を用意する。そのオブジェクトの先端となる座標値を求めるために、本研究ではフラクタル図形の一つであるシルピンスキーのギャスケット [17][18] を利用する。シルピンスキーのギャスケットとは

正三角形の三つの辺それぞれに中点を取り、その中点を線で結ぶことにより、元々の正三角形の中に新しい正三角形を描いていくということを繰り返していくものである。図 3.17 は 2 次元のシルピンスキーのギヤセットである。その三角形の頂点によって  $xy$  平面に関して規則正しい座標値がとれるため、その座標値にオブジェクトを配置する。そして、オブジェクトの高さの  $z$  成分に関しては乱数を利用する。しかし、単純に先ほど得た  $xy$  平面の頂点の  $z$  成分を乱数で決めると、隣接している頂点にも関わらず極端に差が生じ高さにムラが出来てしまい不自然な場合がある。そこで、シルピンスキーのギヤセットの三角形が生成する順番を利用した。新しい三角形を生成する際、三つの辺それぞれに中点をとるが、その中点の  $z$  成分については、両端点の大きい方の値以上とする。隣接する頂点は、三角形の生成した順番が前後どちらかのため、これにより  $z$  成分に極度の差が生じず、オブジェクト間の高さにムラが出来ない。図 3.18 は  $z$  成分に乱数を用いたシルピンスキーのギヤセットである。また、図 3.17 と三角形の数は同じである。

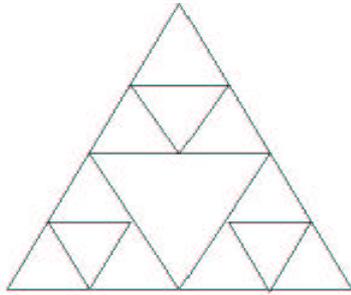


図 3.17: 2次元ギヤスケット

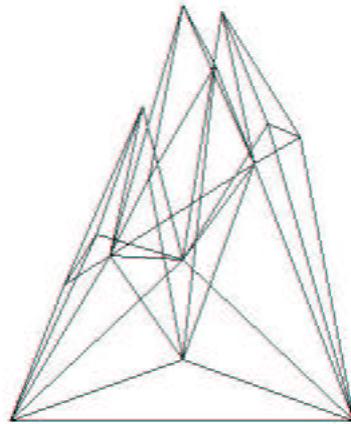


図 3.18: 2次元ギヤスケットに乱数を用いたもの

2次元ギヤスケットに乱数を用いることによって、規則的な配置と不規則な高さを持つ座標値の集合をとることが出来る。この集合を  $xy$  平面に関して鏡映し、得られた座標値とオブジェクト先端の座標値が一致するようにオブジェクトを配置する。また、大きな三角形ほど  $z$  成分が小さいため、範囲内の外側ほど短いオブジェクトが出来る。それは石柱の特徴とも一致する。図 3.19は今までの工程で得た頂点座標値を円柱オブジェクトの先端座標値としたものである。

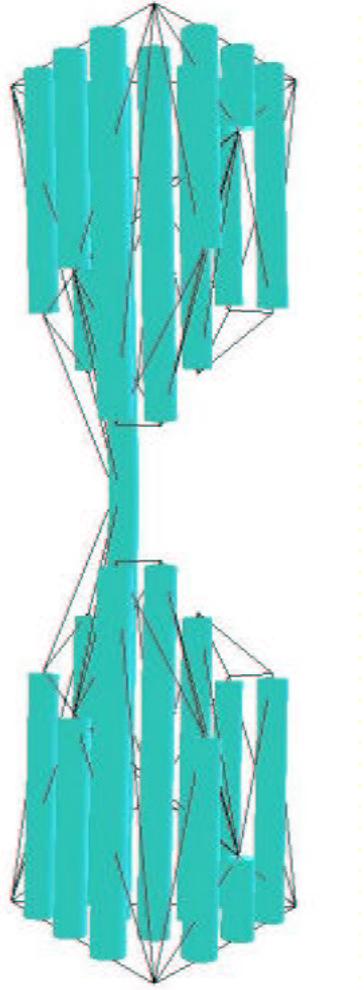


図 3.19: ギャスケットを用いて配置した円柱オブジェクト

# 第 4 章

## 結果と考察

### 4.1 結果

本研究では、鍾乳石の形状を自動生成する手法を提案した結果、代表的な鍾乳石であるつらら石、石筍、石柱の形状を再現できた。3章で述べた形状生成の実現手法を3DグラフィックツールキットであるFK System[19]を用いて実装を行った。

図 4.1は凹凸数とゆがみが変化したつらら石のオブジェクトである。

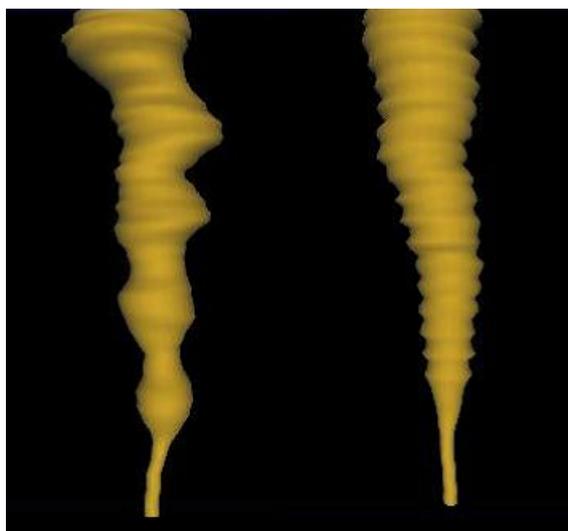


図 4.1: つらら石のオブジェクト

図 4.2はこぶ形状の長さや表面の凹凸が変化した石筍のオブジェクトである。

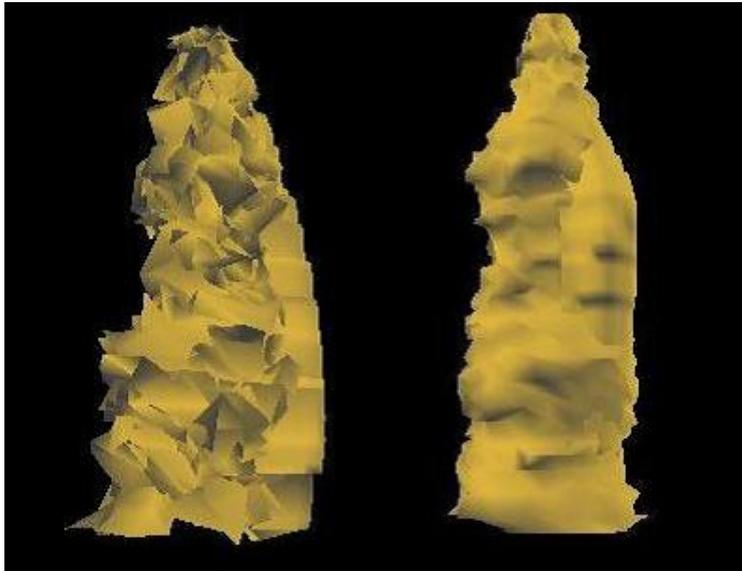


図 4.2: 石筈のオブジェクト

図 4.3はオブジェクト数とポリゴン数が変化した石柱のオブジェクトである。

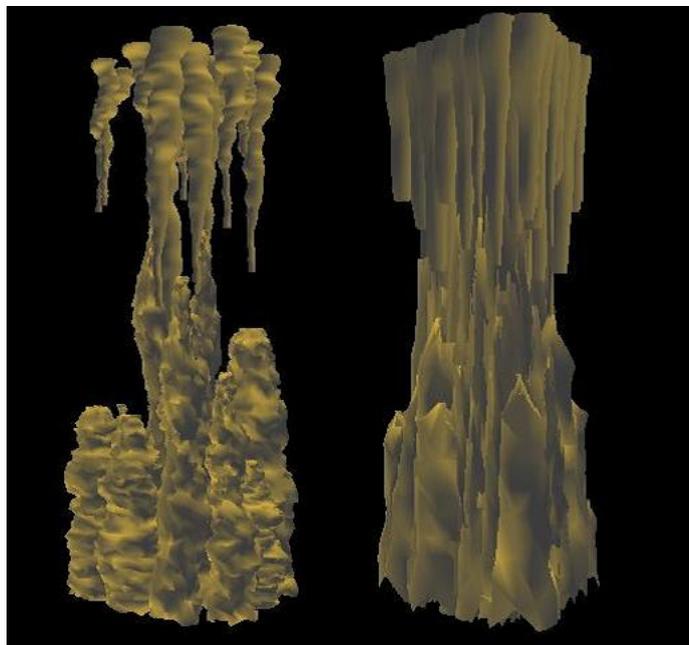


図 4.3: 石柱のオブジェクト

図 4.4は各々の鍾乳石のオブジェクトである。

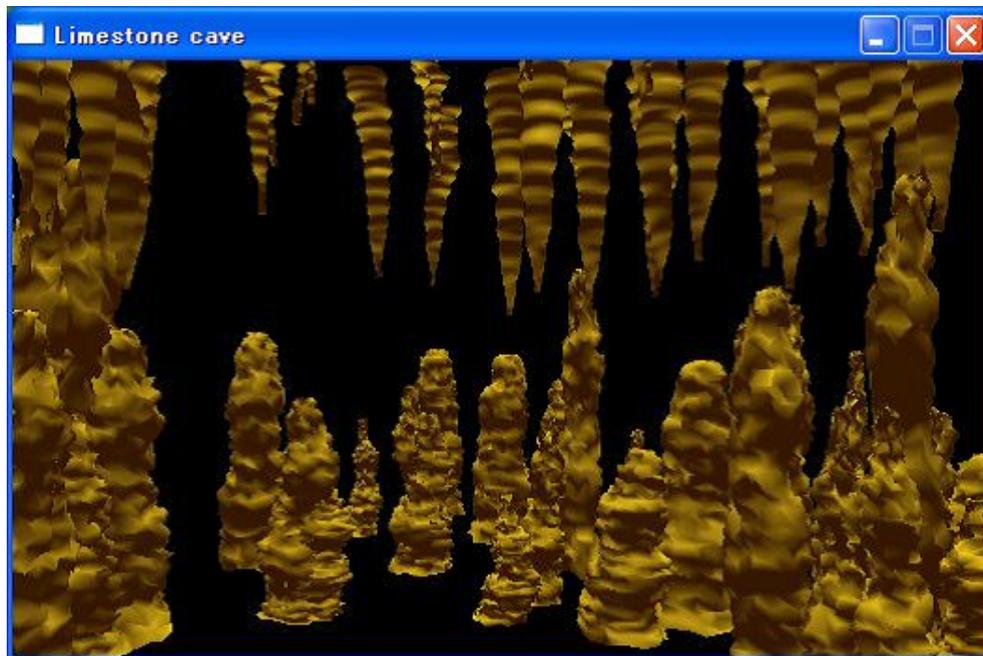


図 4.4: 3種類の鍾乳石オブジェクト

## 4.2 考察

3つのオブジェクトの実現出来た鍾乳石の特徴を下記に述べる。つらら石は先端部分の半径が一定という特徴、滑らかなリング状の凹凸面、中心点の前後左右のゆがみを実現できた。石筍は岩肌のような表面、それに覆いかぶさる滑らかなこぶを実現できた。石柱は多数の鍾乳石が、不規則かつ高さに不自然なムラがないように結合し成長したものを実現できた。本研究では、以上の鍾乳石の特徴を表現できた。しかし、次のような問題点が挙げられる。

- 種類の限定

本研究で形状を生成出来たものは多種である鍾乳石の中の3種類だけである。その3種類の鍾乳石はほとんどの鍾乳洞に存在するが、それだけで構成されている洞窟はない。今後、鍾乳洞全体を生成するためにはもっと多種の

鍾乳石の形状を生成する必要がある。

- 特徴の限定

本研究では各鍾乳石につきいくつかの特徴をあげ形状を生成した。しかし、その特徴は基本的なものだけに留まっている。例えば、2.3.3、2.3.2で述べたような例外的な特徴は考慮していない。どの鍾乳洞にも必ず基本的な特徴のみで形状を表現出来ない鍾乳石があるため、これらを考慮する必要がある。

- 結合部位

本研究では複数オブジェクトを配置したときに、お互い被さり結合した鍾乳石を表現している。実際の鍾乳石は、石と石の間は滑らかに補間されている場合がほとんどである。この方法では、そのような滑らかな接合は表現できない。また石柱オブジェクトの、つらら石オブジェクトと石筍オブジェクトの結合についても同様である。

## 第 5 章

### まとめ

本研究では鍾乳石の形状を自動生成する手法を提案した。生成した鍾乳石の形状は、既存の手法では表現しきれなかった種類ごとの鍾乳石の特徴を考慮している。研究対象とした鍾乳石は3種類で、いずれもほとんどの鍾乳洞にある代表的なつらら石、石筍、石柱である。つらら石の形状の特徴として先端部分の半径が一定という特徴、滑らかなリング状の凹凸面、中心点の前後左右のゆがみを挙げ、その形状生成を実現した。石筍の形状の特徴として岩肌のような表面、それに覆いかぶさる滑らかなこぶを挙げ、その形状生成を実現した。石柱の形状の特徴として多数の鍾乳石が不規則かつ高さに不自然なムラがないように結合し成長したことを挙げ、その形状生成を実現した。また、同一種類でも同一性をなくし複数個描写しても違和感のないものに出来た。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、温かいご支援、ご指導いただきました東京工科大学メディア学部の渡辺大地講師および電気通信大学の和田篤氏に心より感謝いたします。

また日ごろから本研究のサポートをしていただいた、研究室のメンバーに厚く御礼申し上げます。

本研究にご協力していただいたすべての皆様に心から感謝致します。

## 参考文献

- [1] James D.Foley,Andries van Dam,Steven K.Feiner,John F.Hughes, ” コンピュータグラフィックス理論と実践”, オーム社開発局, 2001.
- [2] 前田真秀, ”鍾乳洞におけるつらら石形成のモデル”, 大阪府立大学大学院 工学研究科 西森研, 1993.
- [3] 小西哲郎, ”鍾乳石の形成モデル”, 名古屋大学理学部物理R研, 1993.
- [4] 小川直久研究員、古川義純助教授, ”氷柱表面の凹凸模様の発達を説明する新しい界面不安定モデル”, 低温科学研究所, 2002.
- [5] Martin B. Short, ”The Platonic Ideal of Stalactite Growth”, University of Arizona, 2004.
- [6] Kavita Bala Satyan Coorg, ”Modeling Stalcite and Stalagmite Formation”, Massachusetts Institute of Technology, 1996, <<http://graphics.lcs.mit.edu/~satyan/6891/proj.html>>.
- [7] ”よかところB Y ・写真満載九州観光”, <<http://www.yado.co.jp/>>.
- [8] ”招入洞”, <<http://www.pref.gifu.jp/taiken/bosyu/11/taiken2.htm>>.
- [9] Theodore Kim,Michael Henson and Ming C.Lin, “ A Hybrid Algorithm for Modeling Ice Formation ”, SIGGRAPH, 2004.

- [10] 河野通弘, ”秋吉台の鍾乳洞：石灰洞の科学”, 河野通弘教授退官記念事業会, 1980.
- [11] ”大地から学ぶ南アフリカ”, <<http://www.jsj.org.za/sa02.htm>>.
- [12] 日本ケイビング協会, ”福島県滝根町の洞窟”, JAPAN CAVING 特別号, 1997.
- [13] ”神仙峡”, <<http://khunter.edap.jp/index.html>>.
- [14] ”あじこじ九州”, <<http://www.ajkj.jp/>>.
- [15] ”Bezier 曲線”, <<http://www.edu.ics.saitama-u.ac.jp/>>.
- [16] 羽田 忠弘, ” B e z i e r 自由曲線アルゴリズムの設計及びその応用 ”, 国立熊本電波工業高等専門学校 情報工学科.
- [17] ”Java による図形処理入門”, <<http://www.rs.kagu.sut.ac.jp/~yama/java/>>.
- [18] ”情報処理概論 (Java)”, <<http://web.hc.keio.ac.jp/~fujimura/index.html>>.
- [19] ”FK Toolkit System,”, <<http://www.teu.ac.jp/media/earth/FK/>>.