

奇岩生成過程の数値シミュレーション

秋保美幸 (指導教員 : 河村哲也)

1、はじめに

トルコの首都アンカラの南東にあるアナトリア高原の火山によってできた大地、カッパドキア地方は100km²近くにわたって岩石地帯が広がり、キノコや煙突のような奇岩が林立する。これらは1985年世界遺産に登録されている。数億年前に起きたエンジェルズ火山やハッサン火山による軟らかい凝灰岩は侵食を受けやすく不思議な形の岩々が生成された。また硬い地層と柔らかい地層が重なりあった地域では侵食の程度が違うためキノコのような形の奇岩を生成。そのキノコ岩や何層ものカラフルな岩肌が特徴するカッパドキアの地形は、火山と風雨など100%自然の力より生成された。本研究ではその侵食過程をシミュレーションで再現することを目指す。奇岩生成の過程が研究されていない。カッパドキアの奇岩を完璧に再現するのは困難なので、簡略化したモデルについてシミュレーションを行う。

2、モデル化

一様流の中にFig1のような岩(砂の塊)を仮定し岩の上下の侵食は考えない(侵食を受けるのは側面のみ)

一様硬い岩や柔らかい岩など様々な岩や上半分が固くて下半分が柔らかい岩などをモデルとする。

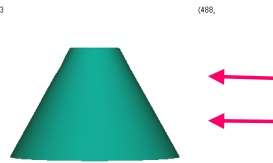
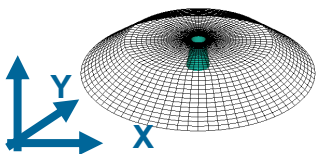


Fig1 80000 800 400

2、計算格子



上面直径を0.5、下面高直径を0.8、高さ1、計算領域全体の下半径を4とする

Fig2: 計算領域

座標変換は格子数を82x41x13とする。

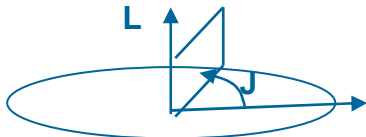


Fig3 ; 座標変換

周方向: J
半径方向: K
高さ方向: L

3、計算方法

3.1 基礎方程式

岩石の周りの一様流を非圧縮性流体とみなせるので連続の式(1)と非圧縮性ナビエ・ストークス方程式(2)を支配方程式として解析できる。砂は、各地点における風の強さに従った量とその風向の向きに重みされる。砂輸送量をベクトルの形式で表したものが式(3)である。式(3)により、各地点での砂輸送量ベクトルが定まると砂

面上の微小面積における砂の質量保存から式(4)が成り立つ。式(4)から、砂面に垂直な方向の高さの時間変化が求まるので、それを用いて新しい砂面形状が決定される。

基礎方程式を無次元化して計算することにより、

岩石周りの流れ場およびそれによる岩石表面形状の変化が時間発展的に求まる。計算は50000ステップ行った。

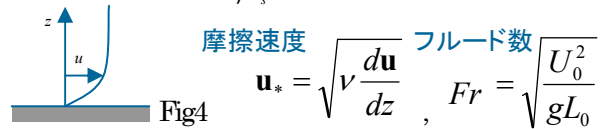
$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

$$\mathbf{q} = b_1 \frac{\rho_0}{\rho_s} |\mathbf{u}_*|^2 \mathbf{u}_* \quad \mathbf{q} = (q_1, q_2) \quad (3)$$

$$\rho_s \frac{dh}{dt} = -\frac{dq_1}{dX} - \frac{dq_2}{dY} \quad (4)$$

$$C_0 = -b_1 \frac{\rho_0}{\rho_s} Fr^2 \quad (5)$$



u:速度ベクトル p:圧力 ρ_0 :空気密度 (一定) ν :動粘性率 (一定) t:時間
b1: 比例定数 (砂の状態や砂面形状に依存) g: 重力係数 ρ_s :砂の密度 h: 砂面に垂直な方向の高さ X,Y: 砂面に平行な面の局所座標

岩石周りの流れを表す式をMAC法で解き、また時間ステップごとに(岩石周りの流れが解ける度)に砂輸送方程式を解いて計算した。

3.2 差分法

基本方程式の差分化を行う。差分近似は時間に関して前進差分、非線形項以外の空間微分に関しては中心差分を用いた。格子が充分に細かくない場合でも安定に計算することができるように非線形項は3次精度上流差分法を用いて計算した。

5、境界条件

計算領域上面・下面・岩石表面はすべりなし条件

$(u, v, w) = (0.0, 0.0, 0.0)$ とする。

遠方境界では一様流であると考え、

$(u, v, w) = (-1.0, 0.0, 0.0)$ とする。

Fig.3のとおり座標変換したため、周方向については周期境界条件を課す。

J1の値はJmax-1の値を、Jmaxの値はJ2の値を採用する。

$(u, v, w) = (0.0, 0.0, 0.0)$ 。下面はL1、上面はLmax。また表面はK1となる

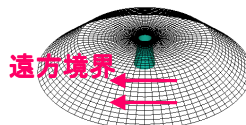


Fig5境界条件

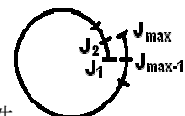


Fig6概念

4、計算結果

5.1 削られ方

式(1), (2)はレイノルズ数を用いて、式(3), (4)は式(5)のようにフルード数Frを含む定数C0で無次元化した。式(5)より、砂密度 ρ_s が大きいとき、すなわちC0が小さいとき硬い岩、砂密度 ρ_s が小さいとき、すなわちC0が大きいとき柔らかい岩と考えられる。レイノルズ数は100に固定し、C0を変化させて岩石の削られ方を比較した。初めにC0=0.001/200, 0.005/200, 0.001/200の3つを比較する。C0が大きいほど削られ方が大きい様子が観察できる。

次に上部1/3は硬い層とし、下部2/3は柔らかい層とした。(硬:軟=1:2) まずFig10は上部のC0を0.001/200、下部のC0を0.0001/200で計算した結果である。ここでほとんど変化はみられない。同様にfig11は上部のC0を0.005/200、下部を0.0005/200で計算した。さらに目標の形に近づけるためFig12は硬:軟=1:4とし上部のC0を0.01/200、下部のC0を0.001/200として計算した結果である。それぞれ風向き一定(後方から)

5.2 圧力

今回、側面が大きく削られています。

圧力が低いのになぜ削られるのか一見不思議だが、砂輸送方程式(3)を見ると砂輸送量qは速度の3乗に比例します。つまり、速度が速いところほど砂輸送量が大きい→たくさん削られるということになる。そう考えると、台形の側面が削れるのは妥当な気がする。それぞれfig13はfig10の、fig14はfig11の、fig15はfig12のときの圧力に対応している。

6、まとめと課題

本研究では風による岩の侵食についてシミュレーションを行い、砂密度の大きさによりどの様に侵食されるかを調べた。

その結果砂密度の小さいほうが大きく削れることが分かった。また圧力は側面に強くかかり側面から削れていく。

今回は外部の力を風だけに絞って考えたが、実際は風だけでなく作り上げられたものではない。今後の課題として、今後の他の要素も取り入れて考える必要がある。また実際の岩石(きのこ形)により近づけるため上部と下部の比率やC0のとり方をもっと考える必要がある。

7、謝辞

本研究を行うにあたり、ご尽力くださいました指導教員の河村先生、諸先輩方に深く感謝いたします。

8、参考文献

- [1] 河村哲也、桑原邦郎、小紫誠子、管牧子；環境流体シミュレーション 2001
- [2] 管牧子；数値シミュレーションの乾燥地環境問題への応用、お茶の水女子大学大学院博士論文 2001
- [3] 河村哲也；流れシミュレーションの基礎 2002

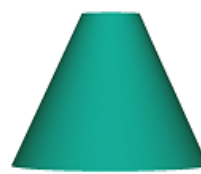


Fig7: C0=0.0001/200



Fig8: C0=0.005/200



Fig9: C0=0.01/200



Fig10: 上部 C0=0.001/200
下部 C0=0.0001/200

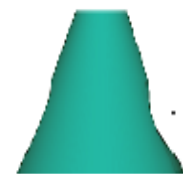


Fig11: 上部C0=0.005/200
下部C0=0.0005/200



Fig12: 上部C0=0.01/200
下部C0=0.001/200

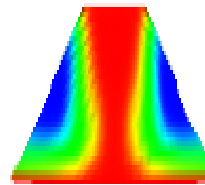


Fig13: Fig10 の圧力

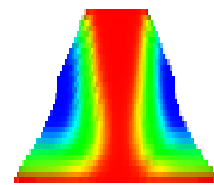


Fig14: Fig11 の圧力

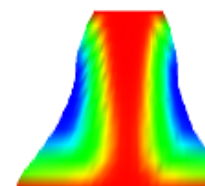


Fig15: Fig12 の圧力