

木星火球シミュレーション：メタンバンド観測の有効性

片桐陽輔¹, 柳澤正久¹

¹ 電気通信大学

1 概要

木星領域における小天体のサイズ分布は未だ謎が多く、その解明は太陽系の起源や進化に迫るものであると言える。それを知る方法の1つとして木星火球という現象が挙げられる。これは、木星にメテオロイド(小天体)が衝突する現象であり、地球の流星現象と同じく木星大気中で発光が起きる(図1)。木星火球のモニター観測においては、木星自体の明るさを暗くできるメタンバンドフィルタが有効だとされている。このフィルタは、889 nm 付近の波長のみを透過し、それ以外の波長をカットする。木星大気にはメタンが含まれており、889 nm 付近の光を吸収するため、木星自体の明るさを減らすことができる。

しかし、木星火球観測にメタンバンドフィルタを用いることが有効であるかどうかは木星火球の発光高度に依存し、木星大気深部での発光だと火球自体も明るく写らない。そこで本研究では、木星火球を計算機上でシミュレーションする。この計算から得られる発光高度から木星火球観測におけるメタンバンドフィルタの有効性を検討する。



図1: 木星火球. 2010年6月3日20時31分(UTC).

A. Wesley氏撮影.

<http://www.Gishbartimes.org/2010/09/paper-detection-of-superbolide-on.html>

2 火球シミュレーション

2.1 基本方程式

木星にメテオロイドが突入する現象を以下の3つの微分方程式[1]で表す。

$$\frac{dv}{dt} = -C_D \frac{\rho_g A v^2}{m} \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (2)$$

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} -\frac{C_H \rho_g A v^3}{2\zeta} \left(\frac{v^2 - v_{cr}^2}{v^2} \right) & (v \geq v_{cr}) \quad (3a) \\ 0 & (v \leq v_{cr}) \quad (3b) \end{cases}$$

t : 時間, v : 速度, x : 進行速度, m : 質量, A : 断面積(時間関数), ρ_g : 大気密度, C_D : 抵抗係数, C_H : 熱伝導定数, v_{cr} : アブレーション臨海速度, ζ : アブレーションに要する熱エネルギー

式(1)はメテオロイドの速度変化を表した式であり、運動方程式を式変形したものである。式(2)は速度の定義である。式(3)はアブレーションによる質量変化を表した式であり、速度がアブレーション臨海速度を上回っているときのみアブレーションが起こり、質量が減少する。

2.2 木星大気モデル

本研究では木星大気密度が高度のみに依存すると仮定した大気モデル[2]を用いる。ただし計算では、高度変化を指数関数で近似したものを用いる。なお、高度の原点は木星大気圧が1 barとなる点にとる。近似した大気密度関数を以下に示す。

$$\rho_g(h) = \rho_{g0} e^{-h/H_g} \quad (4)$$

$$\rho_{g0} = 0.36 \text{ kg/m}^3, H_g = 7.14 \text{ km}$$

3 計算結果

上記の基本方程式(1), (2), (3)の近似解を4次ルンゲ=クッタ法を用いて導出する。なお、計算ステップ間隔はメテオロイドの初速度でメテオロイドの初期半径を移動する時間としている。得られた速度と質量の変化の様子を高度の関数として図3に示す。また、この計算に用いたメテオロイドのパラメータは以下の通りである。今回、メテオロイドの成分は氷であると仮定する。

初期半径 $a_0 = 10$ [m], 初速度 $v = 60$ [km/sec],

密度 $\rho_p = 500$ [kg/m³], 初期高度 $h_0 = 500$ [km],

入射角 $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$.

4 考察

図2より、質量がゼロになり、計算が終了していることがわかる。各計算ステップ毎の速度と質量が得られるのでそこから単位時間あたりの運動エネルギーの減少を求める

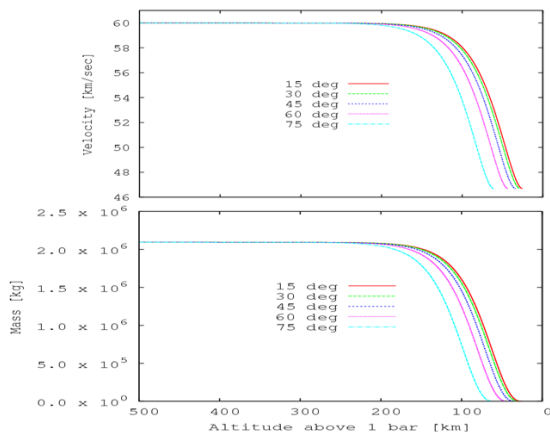


図 2: . メテオロイドの速度変化 (上図) と質量変化 (下図).

ことができる。これはメテオロイドが抵抗力に抗した単位時間あたりの仕事率であり、この一部が発光エネルギーになっている。仕事率の変化の様子を高度の関数として図 3 に示す。

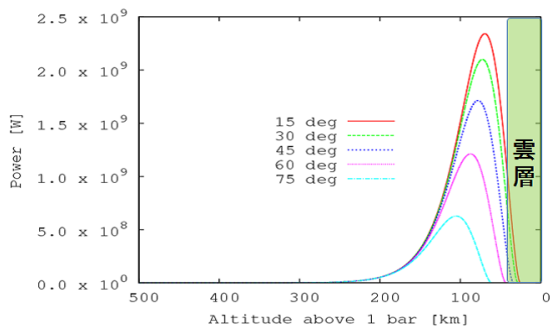


図 3: メテオロイドの仕事率変化.

図 3 より仕事率は高度 70 km 付近でピークになる (入射角 15 のとき)。木星火球 (メテオロイドの発光) の発光の大部分はこの高度で起きていると考えられる。木星本体の光は太陽光が雲で散乱されたものであるためメタンによる吸収率は雲の高度で決まる。木星の雲層の上部は高度 40 km であるため、高度差は約 25 km となる。

吸収率の差を見積もるために、メタンバンド (884 ~ 894 nm) におけるメタンの吸収係数 [3] から、高度ごとのメタンによる光吸収率を導出したものを図 4 に示す。

図 4 をみると、火球の発光はほとんど吸収されず、木星の光は約 25 % 吸収されていることがわかる。さらに木星の光路は往復分であるため、実際は約 45 % 吸収されていることがわかる。この結果から、火球の発光はほとんど吸収されずに、木星の光を吸収していることがわかる。

しかし、図 4 をみると高度 100 km 以下のときの吸収率は急激に変化するため、発光高度が少し低くなっただけで木星の光と同じ位吸収されてしまう。この結果だけではメタンバンド観測の有効性を証明できない。そこで、メテオ

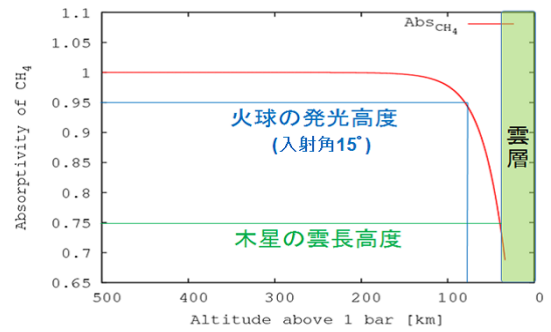


図 4: メタンによる光吸収率変化 (入射角 15).

ロイドが大気中でフラグメンテーション (分裂) する可能性を考えてみる。図 5 に高度ごとのメテオロイドの受ける動圧変化と分裂点を示す。なお、分裂条件は動圧が 0.7 気圧を超えたときに初期分裂が起き、以降は動圧が 1.58 倍になる度に起きるものとする [4]。

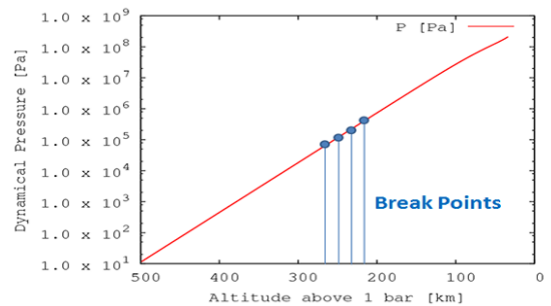


図 5: . メテオロイドの動圧変化と分裂点.

図 5 より高度 300 ~ 200 km 間に分裂が起きると推定できる。分裂が起きる場合、発光は今回の計算結果よりも上空で起きると考えられる。

今後は、メタンバンド観測の有効性を証明するために、フラグメンテーション (分裂) も考慮した火球モデルを考慮した火球モデルを構築する予定である。

参考文献

- [1] Melosh, H. J. , " Impact Cratering ", Oxford Univ. Press, pp 245, 1989.
- [2] Gladstone, G. R. " Hydrocarbon Photochemistry in the Upper Atmosphere of Jupiter ", ICARUS 119, 1-52, 1996.
- [3] James, J. O 'Brien and Homg Cao, " Absorption spectra and absorption coefficients for methane in the 750-940 nm region obtained by intracavity laser spectroscopy ", Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 75, 323-350, 2002.
- [4] Borovicka, J. and Spurny, P. " Radiation Study of Two Very Bright Terrestrial Bolides and an Application to the Comet S-L 9 Collision with Jupiter" ICARUS 121, 484-510, 1996.