

太陽フレア開始時における不安定性とカタストロフ

石黒 直行 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

太陽の研究、特にフレアトリガー問題に関してこれから研究を進めるにあたって、今回 Bernhard Kliem の *Catastrophe versus instability for the eruption of a toroidal solar magnetic flux rope* という論文の紹介を行う。この論文では、太陽表面での爆発現象の始まりが磁場の不安定性として、もしくはカタストロフとして形成され（ここでカタストロフというのは、主に考えている変数とは別のパラメーターの変化によって、平衡条件が変化することを表している）、その両方が平衡下での力のつりあいに関する同じ方程式から出発していることを述べている。このときに、外部の 2 重極子もしくは四重極子内部のトロイダルフラックスロープを電流を輸送するフラックスのモデルとして用いると、パラメーター空間における安定な領域中での平衡消失のために、代表的な発展過程でのカタストロフの折りたたみが生じることを説明している。さらにこのカタストロフとトーラス不安定性は同じ点で生じ、そのために太陽爆発の始まりの状況下で同様の描像になる、と示している。

1 Introduction

太陽フレア爆発現象の解析は、多波長にわたる観測やその結果に基づいた数値計算といった様々な観点からの解析がなされている。フレアや CME (コロナ質量放出) の初期段階には flux rope と呼ばれる、ループ状の磁場構造が形成されている。この flux rope の成長を記述するモデルのひとつに、Torus Instability (Kliem, Torok [2006]) が提案されている。この発表では catastrophe と Torus Instability の比較研究である "Catastrophe versus Instability for the eruption of a toroidal solar magnetic flux rope", B.Kliem et al. (2014) の紹介を行う。

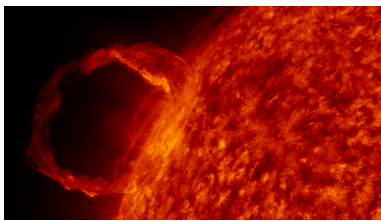


図 1: SDO 衛星に搭載された AIA によって観測された太陽表面でのプロミネンス (2010 年 4 月 21 日)

2 catastrophe と不安定性

一般的には系の振る舞いの急激な変化のことを catastrophe と呼び、数学的には Tom によって系統的分類が与えられている。この catastrophe を理解するために、次の単純な例、空間座標 x とパラメーター a を用いて、

$$V_a = -\frac{1}{3}x^3 + ax \tag{1}$$

という形式のポテンシャルの振る舞いを考える。空間に関して系に働く力は $F(x) = dV_a/dx$ であることより、平衡点は $F(x) = 0$ 、つまり $x^2 - a = 0$ と表すことができ、パラメーター a の値によって平衡点の位置が決定できる。これは次のように分類される。

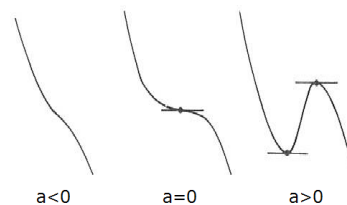


図 2: パラメーターによる平衡点の変化

→ $a > 0$ では平衡点は 2 つ存在、それぞれ安定と不安定

→ $a = 0$ では平衡点は 1 つ存在、不安定
 → $a < 0$ では平衡点は消え、必ず不安定となる
 つまり、パラメーター a が正から負へと移るにつれて平衡点が消失し、系の振る舞いが大きく変化することがわかる。

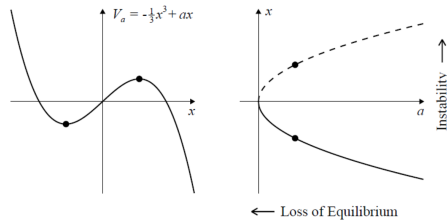


図 3: (左) ポテンシャルのプロット (右) パラメーターと平衡点のプロット

3 方程式系とモデル

次に flux rope のモデルととくべき方程式を紹介する。基本的には Torus Instability と同様の条件を考える。主な条件を挙げると

- flux rope は大半径 R 、小半径 a であるトーラスの形
 - トーラスの形状は自己相似形を仮定 (→ $R/a = const$)
 - トーラス内部に合計 I の電流が流れている
 - 外部磁場はトーラス平面に垂直に交わる
- トーラスの大半径の運動方程式は次のように表すことができ、

$$\rho_m \frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 a^2 R} \left[\ln\left(\frac{8R}{a} - \frac{3}{2} + \frac{l_i}{2}\right) \right] - \frac{IB_e(R)}{\pi a^2} \quad (2)$$

右辺第 1 項はトーラス電流が作る磁場によるローレンツ力 (hoop force)、第 2 項は外部磁場によるローレンツ力を表している。

外部磁場によるトーラス面内を貫く磁束は次で表せる。

$$\Psi_e(R) = -2\pi \int_0^R B_e(r) r dr \quad (3)$$

ところで Torus Instability の不安定性の条件は、力が釣り合う平衡点で、傾きが 0 より大きければよい、としており

$$\frac{d}{dR} \left(\rho_m \frac{d^2 R}{dt^2} \right)_{R=R_{eq}} > 0 \quad (4)$$

ここで R_{eq} は平衡点での R を表す。外部磁場を $B_{ex}(R) = BR^{-n}$ と仮定、このとき指数部 n の条件が決まって、

$$n > n_{cr} = \frac{3}{2} - \frac{1}{4c} \quad (5)$$

となる。($c = \frac{L_e}{\mu R}$ 、 L_e は外部インダクタンス) この decay index n_{cr} を今回の catastrophe での場合と比較する。

4 catastrophe と不安定性の比較

外部磁場として双極子磁場を与える

$$B_e(R) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{qL}{(R^2 + L^2)^{3/2}} \quad (6)$$

q 、 L はそれぞれ磁極の強さ、トーラス面と磁極の距離を表す。また双極子磁場での decay index は $n_{bp} = -\frac{d \ln B_e}{d \ln R} = 3(L^2/R^2 + 1)^{-1}$ と定義できる。無次元化した空間座標 $\xi = R/L$ を用いて、磁束は次の形にかける。

$$R^2 B_e(R) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{q\xi^2}{(\xi^2 + 1)^{3/2}} \quad (7)$$

$$\Psi_e(R) = \mu_0 q \left[\frac{1}{(\xi^2 + 1)^{1/2}} - 1 \right] \quad (8)$$

$q(t) = \sigma(t)q_0$ 、 $L = L_0$ 、つまり磁極の強さをパラメーターに変化させたときの平衡位置をプロットすると、平衡点が消失するのは

$$\xi = [(6c - 1)/(6c + 1)]^{1/2} \rightarrow n_{bp} = \frac{3}{2} - \frac{1}{4c} \quad (9)$$

となる。

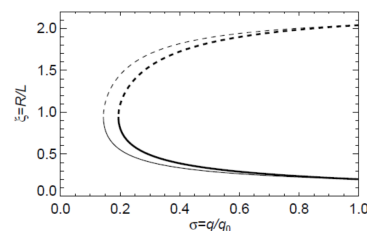


図 4: 外部双極子磁場のとき、磁極の強さをパラメーターとして変化させたときの平衡点のプロット

したがって catastrophe の点と torus Instability の開始は対応しており、全く同じ decay index で表すことがわかった。

5 まとめと展望

catastrophe 理論は、平衡点が生成または消失するなどによって系の振る舞いが急激に変化することを体系化したものである。

torus instability と同様の条件を設定し、磁極の強さをパラメーターとして変化させたとき、平衡点が消失する条件を調べることで、catastrophe の発生する臨界点と torus instability の開始はまさに一致していることがわかった。

・今後の展望

torus instability は自己相似形の flux rope を仮定して不安定性の条件を求めているが、実際の flux rope はより複雑な形状をしている。そのためより現実的な形状の flux rope における不安定性の条件、太陽表面から CME が発生する条件を求める必要がある。

Reference

Kliem et al. (2014)

Kliem and Torok (2006)