

# 偏光観測により得られた MHD 波動の性質 -Fujimura & Tsuneta (2009) 再考-

加納 龍一 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

MHD 波動、特に Alfvén 波が太陽コロナの加熱を理解するための鍵として注目されている。太陽大気に存在するプロミネンスやスピキュールで多くの Alfvén 波の観測例が存在するが、Alfvén 波が励起されている現場や散逸されている現場を観測した例は少ない。また、これまでの多くの研究では撮像データから波動の物理量を求めており、偏光観測により磁場データを用いて定量的な議論をした研究はほとんどない。我々は偏光観測により MHD 波動の性質を調べた先行研究 (Fujimura&Tsuneta 2009) に着目した。この研究は Hinode 衛星の可視光望遠鏡に搭載されている SP(Spectro-Polarimeter) を用いて偏光分光観測を行い MHD 波動の性質を調査したものである。しかしながら先行研究で行われた観測の時間分解能は 67 秒であり、3 分程度で振動する MHD 波動を同定するにあたり、振動の様子を波形から読み取り議論することは難しかった。そこで我々は新たに観測提案を行い、高時間分解能 (21 秒) で MHD 波動の観測を行った。データを解析した結果、周期的に振動するシグナルを速度場、放射強度、磁場について得ることができた。観測された速度場と磁場の関係を調べたところ、それらの位相が揃っていることがわかった。このことは、観測された磁場の振動が Alfvén 波によるものだけでなく、太陽の固有振動である P-mode 振動により励起された音波により引き起こされた観測高度の周期変化による見かけの振動である可能性が大きいという結論を得た。だがしかしこれは物理量を空間的に平均した結果である可能性もあり、この点についての解析は現在進行中である。

## 1 Introduction

太陽表面 (光球) の温度は約 6000 度であるが、そのわずか数千 km 上空には、数百万度のコロナが存在している。太陽の中心核でエネルギーが発生していることを考えれば、熱伝導以外のメカニズムにより上空のコロナを加熱しなければならないことがわかる。しかしその加熱メカニズムの最終決着にはまだ至っておらず、このことは「コロナ加熱問題」と呼ばれている。太陽コロナの加熱メカニズムとして、「ナノフレア加熱説」と「波動加熱説」の 2 つが有力な候補であると考えられてきた。本研究では、「波動加熱説」に注目していく。波動加熱説とは、光球における対流運動が磁気流体的 (MHD) 波動を励起し、上空にエネルギーを運ぶことでコロナを加熱するという説である。具体的には MHD 波動の中でも特に磁気張力を復元力とした Alfvén モードの波動が加熱に重要な影響を与えていると考えられている。

波動は Hinode 衛星の撮像データによりこれまで

多くの場所で発見されている。コロナ加熱のメカニズムを理解するための次のステップは、観測された波動が励起される場所や散逸される場所を定量的なデータを用いてエネルギー収支を議論するということである。そういった定量的な議論するためには磁場強度を観測する必要があり、そのためには偏光観測が重要となってくる。

## 2 Previous works

### -Fujimura&Tsuneta(2009)-

我々は偏光観測を用いて MHD 波動の性質を調査した Fujimura & Tsuneta (2009) という先行研究に着目した。この研究は偏光分光観測を用いて MHD 波動の性質を定量的に調査した数少ない先行研究であり、観測データから上空へ伝播する Poynting Flux を見積もったという点では世界で唯一の論文である。この先行研究では P-mode 振動という対流起源の固

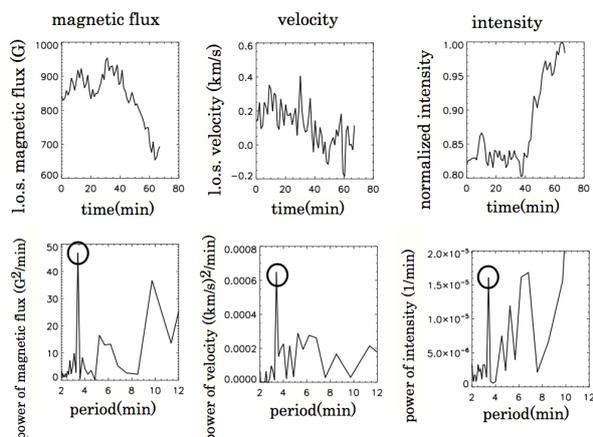


図 1: Fujimura & Tsuneta (2009) で扱われた物理量の微小変化

有振動が発生させる MHD 波動に着目している。周期的に磁場・速度場・放射強度が同一周期で振動している様子が捉えられ (図 1)、これらの振動は P-mode 振動が磁束管を揺らすことによって生じた MHD 波動によるものだろうと先行研究では結論付けている。

しかし注意しなければならないことは、これらの物理量の振動は MHD 波動の存在の直接的な証拠にはならないということである。放射強度と磁場強度の位相が揃っていたら、この振動は P-mode 振動が引き起こした観測高度の周期変化による見かけの振動である可能性が存在するのである (図 2)。先行研究では時間分解能は 67 秒とあまり良くなく、波形を直接比較することで位相関係を調べることができなかった。そのために先行研究ではフーリエ変換を行い強いパワーを持った周波数成分だけを逆フーリエ変換して位相関係を求めていた。だが、P-mode 振動が一つの周波数を保ち続ける保証は存在しない。このことより、高時間分解能の観測で実際に波形を見て放射強度と磁場強度の位相関係を改めて確認する必要があると筆者は考えた。

### 3 Methods/Instruments and Observations

Hinode 衛星の可視光望遠鏡 (SOT) に搭載されている Spectro-Polarimeter (SP) を用いて観測を行った。

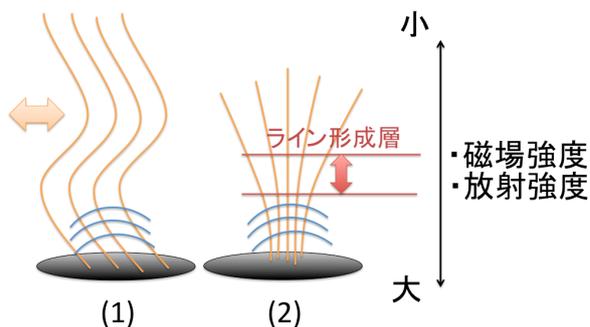


図 2: 磁場の振動を引き起こす二つの可能性

SP は 630nm 付近に存在する中性の鉄原子起源の吸収線二つ、およびその周辺の連続光を高分散スペクトルとして偏光分光観測し、その結果光の偏光状態を表す 4 つのパラメータ (Stokes-IQUV) を測定することができる。ここで I は放射強度、QU は直線偏光した光、V は円偏光した光に感度がある。観測される吸収線はゼーマン効果によって磁場強度に比例して形を変える。このことを利用して磁場強度を求めることができる。また、磁場の中にある原子が視線方向へ運動している場合、中心波長からのズレをドップラー効果を用いて逆算することで視線方向のプラズマの運動を測定することができる。

今回観測したいと思っている磁場の微小変動は先行研究の見積もりにより数ガウス程度であると考えられるので、数ガウス程度のズレにも感度のある Stokes-V (視線方向磁場) のみを用いて議論を行う。物理量は Milne-Eddington 大気を仮定して Unno-Rachkovsky 解を用いてフィッティングを行い導出した。また、SN の向上のために 3 秒角 × 3 秒角の領域内で物理量を平均した。観測対象は太陽中心から 50 度程度離れた磁場の強い領域 (plage 領域) である。時間分解能は 21 秒と、先行研究から 3 倍程度向上させた。Fujimura & Tsuneta (2009) も、時間分解能以外は同様の解析手段を用いている。

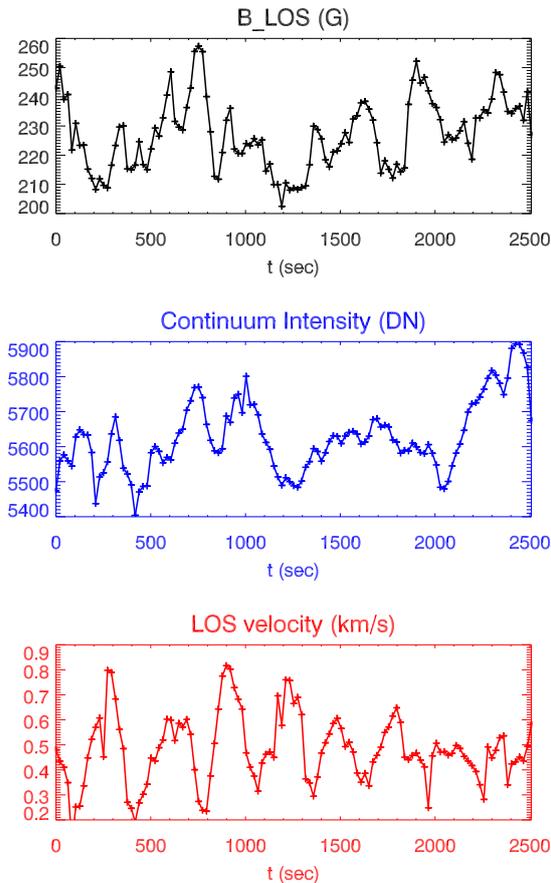


図 3: 観測された磁場、速度場、放射強度の時間発展

## 4 Results and Discussions

### 4.1 物理量の位相関係

観測された磁場、速度場、放射強度の時間発展を図 3 に示す。どの物理量についても周期的に振動する成分が存在していることが見て取れる。これらの物理量の振動の位相関係を調べるために、長周期成分を移動平均を引くことにより取り除き、物理量の散布図を用いて位相関係を確認した (図 4、5)。その結果、磁場強度と放射強度は正相関 (相関係数 0.45) し、磁場強度と視線方向速度場は逆相関 (相関係数  $-0.39$ ) していることがわかった。磁場強度と放射強度の位相関係は、見かけの振動による磁場強度変化のメカニズムと整合している。

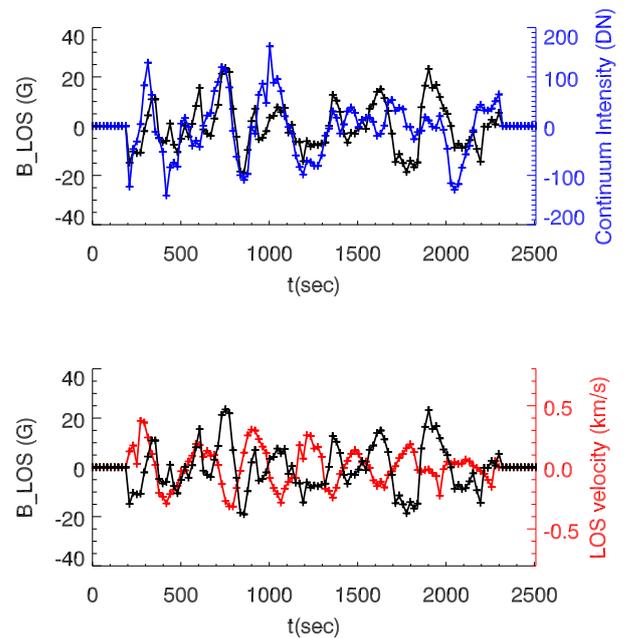


図 4: 移動平均を引き、各々の波形を比較した図

### 4.2 先行研究で用いられた手法との比較

先行研究では、フーリエ変換の結果得られた強いピークにのみ逆フーリエ変換を用いて位相関係を求めていた。今回の観測で得られた物理量にフーリエ変換を行った結果が図 66 である。これを見てみると、磁場と速度場には共通の周波数に強いピークが立っていることがわかるが、放射強度についてはこれは見られない。先行研究ではこの場合は放射強度が振動していないために見かけの振動ではなく Alfvén モードであると結論付けていた。だが、4.1 節での解析結果は Alfvén モードによる磁場の振動を支持する結果とはなっていない。この差異はたったひとつの周波数に対して逆フーリエ変換を用いて議論しているために生まれたものであると筆者は考えている。振動の周波数が時間的に変化していく場合には、たったひとつの周波数に着目した先行研究の手法は対応できない。

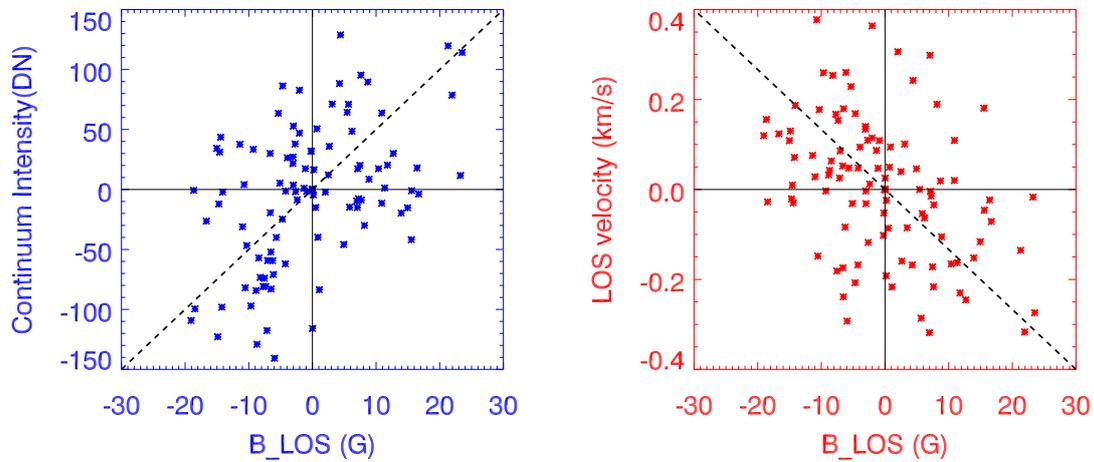


図 5: 物理量の散布図

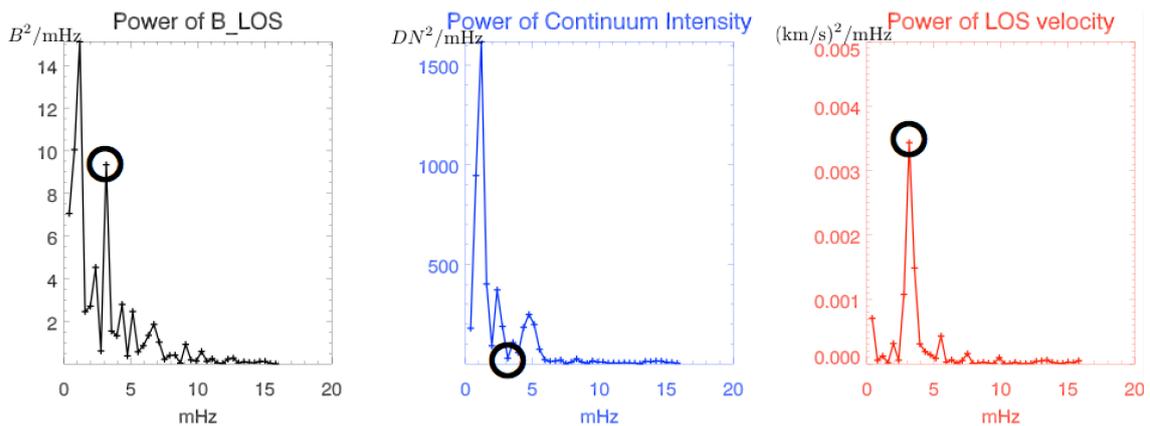


図 6: Fujimura & Tsuneta (2009) と同様にフーリエ変換を行った結果

## 5 Future works

今回の解析では磁場強度と放射強度の位相が揃う傾向が強かった。この位相関係は、磁場の振動は Alfvén モードの波動によるものだけではなく見かけの振動による効果が存在していることを示唆している。しかし注意すべきことは、MHD 波動による磁場の振動成分の存在を否定はしていないという点である。磁場強度と放射強度の相関係数はそれほど高くない。このことは、MHD 波動による振動と見かけの効果による振動の両者が共存しているためであると思われる。筆者は空間分解能を向上することによりこれら

二つの振動を分離させることができるのではないかと考え、空間分解能依存について現在解析を行っている最中である。