

# 京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡を用いた エラーマンボムの高度詳細解析

市川 椋大<sup>1,\*</sup>, 野澤 恵<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>茨城大学理学部

## Detailed altitude analysis of Ellerman bomb using the domeless solar telescope at the Hida Observatory, Kyoto University

Ryota ICHIKAWA<sup>1,\*</sup>, Satoshi NOZAWA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ibaraki University College of Science, 2-1-1, Bunkyo, Mito, Ibaraki, Japan, 310-8512

\*23nm302at@vc.ibaraki.ac.jp

(Received 2023 September 25; accepted 2023 November 29)

### 概要

エラーマンボムは彩層底部で起こる小規模爆発現象であり、 $H\alpha$ 線中心では吸収、ウィング部では顕著な増光が見られる特徴的なスペクトルプロファイルを示す。発生メカニズムは磁気リコネクションと考えられているが、その詳細は未だに未解明のままである。そこで、エラーマンボムのスペクトル特性から立体的な構造の時間変動を解明することが本研究の狙いである。2022年10月に京都大学付属飛騨天文台の水平分光器を用いて、 $H\alpha$ 線とCa II K線で観測した活動領域NOAA13124とNOAA13135の黒点近傍で発生したエラーマンボムを分光観測し、各波長から速度・温度・明るさの物理量の時間変動を求めた。結果、 $H\alpha$ 線では彩層下部で磁気リコネクションが発生し、それによる双方向流を観測した。また、ウィング部の速度と明るさに関して、明るさが増加したタイミングで速度が上昇するような相関が確認できた。Ca II K線では彩層中部以下で磁気リコネクションが発生したと考えられ、 $K_2$ コンポーネントに関しては $H\alpha$ 線ウィング部と同様に速度と明るさに相関が確認できた。

### Abstract

The Ellerman bombs are small-scale explosive events that occur at the base of the chromosphere and exhibit a characteristic spectral profile, showing absorption in the  $H\alpha$  line center and significant brightening in the wing. While magnetic reconnection is considered to be the mechanism of their occurrence, the details remain unresolved. Therefore, the aim of this study is to elucidate the temporal evolution of the three-dimensional structure of Ellerman bombs through their spectral characteristics. Using the horizontal spectrograph at the Hida Observatory, Kyoto University, in October 2022, we conducted spectroscopic observations of Ellerman bombs that occurred in the vicinity of sunspots in active regions NOAA13124 and NOAA13135, using the  $H\alpha$  and Ca II K lines, and obtained the temporal variations of physical quantities such as velocity, temperature, and brightness at each wavelength. As a result, we observed magnetic reconnection at the base of the chromosphere in the  $H\alpha$  line, and bi-directional flow resulting from it. Furthermore, we confirmed a correlation between the increase in brightness and the subsequent rise in velocity in the wing. In the Ca II K line, we considered magnetic reconnection to occur below the middle of the chromosphere, and we found a similar correlation between the velocity and brightness of the  $K_2$  component as in the  $H\alpha$  line wing.

**Key words:** Sun : Chromosphere – Sun : Magnetic Reconnection – Sun : Ellerman Bomb

### 1. はじめに

エラーマンボム(EB)は1917年にEllermanにより発見された彩層中の小規模な爆発現象である(Ellerman 1917)。 $H\alpha$ 線による分光観測結果からは、ライン中心では周囲の静穏領域と同じ吸収が見られ、ウィング部で増光が見られるという特徴的なスペクトルを持つことが明らかになった。典型的なサイズは1 arcsec程度、寿命は15分程度と短く、一般的に浮上磁場領域や黒点半暗部の縁に生じる。高空間分解能観測では細長いジェット状をしており、しばしばサージを伴う。

EB形成についての解釈はこれまでにいくつか提唱されている。Kitai (1983)は彩層のnon-LTE計算によりEBに特徴的な $H\alpha$ 線プロファイルの再現を行った。一方で、Henoux, Fang, and Ding (1998)はエネルギー粒子ビームによる大気加熱を考え $H\alpha$ 線プロファイルの再現を試みた。2つの研究により太陽大気中の低い領域(彩層下部)による加熱がEBに特徴的な $H\alpha$ 線プロファイルを形成することが示唆された。Pariat et al. (2004)は対流層中の磁束管が周囲のプラズマ運動で波打つように変形し、パーカー不安定性によって変位が増大することで $\Omega$ 型ループが連なった形で磁束管が浮上する。そして隣り合う $\Omega$ 型ループの間

(bald patch)での磁気リコネクションによってEBが発生するresistive emerging flux tubeモデルを提唱した。Pariat et al. (2007)による浮上磁場領域のEBの統計解析からは、発生したEBの半数近くが浮上磁束管のbald patchに局在することが明らかになった。Isobe, Tripathi, and Archontis (2007)は2次元のMHDシミュレーションを行いresistive emerging flux tubeモデルの再現を行い、磁気リコネクションの結果彩層が加熱されたジェットが発生する様子を再現した。磁気リコネクションは、コロナ高層での太陽フレアの主要なエネルギー放出のメカニズムであると考えられているが、低層でも起こり、EBをもたらす可能性がある。太陽フレアを引き起こす磁気リコネクションとEBを引き起こす磁気リコネクションは発生高度の違いだと考えられているが、この違いをもたらす原因はわかっておらず、最近Chae, Moon, and Park (2003)は、磁気リコネクションは光球と彩層の異なるレベルで起こり、優先的な高さはないと提唱した。彩層で起こる磁気リコネクションはコロナで起こるものと比べ規模は小さいが、プラズモイド形成・スローモードおよびファーストモードのショックなど、リコネクションにとって重要な特徴は観測されている。(Lin & Ni 2019)このような研究から磁気リコネクションがEBを引き起こすという考えが有力であるが、EBの発生メカニズムとエネルギー変換機構の詳細はまだ明らかになってはいない。

EBの異なる高度での速度導出は過去様々な観測が行われている。光球では、Severny (1968)がEBs大気で1–3 km s<sup>-1</sup>の上昇流を報告している。一方、Georgoulis et al. (2002)はEBsの統計的研究を行い、80%以上のEBsが0.1–0.5 km s<sup>-1</sup>の下降流を伴うことを発見した。彩層では、6 km s<sup>-1</sup>の上昇流がいくつかのEBで観測されている(Kitai 1983)。Kurokawa et al. (1982)もEBsの増光期に8 km s<sup>-1</sup>の上昇流を発見している。Chen, Fang, and Ding (2001)はこれらの上昇流を彩層での磁気リコネクションの数値シミュレーションによって再現した。また、Matsumoto et al. (2008)がH $\alpha$ 線の単波長分光観測からEB発生時の光球・彩層間の平均速度を求めた。結果として光球では0.1–0.3 km s<sup>-1</sup>の下降流、彩層では1–2 km s<sup>-1</sup>の上昇流が確認できたことから、このことがEB中における磁気リコネクションの証拠となると主張している。しかし、EBを伴う彩層間での磁気リコネクションの特徴などはわかっていない。この研究の目的は、EB領域を多波長高時間分解能分光観測を行うことで異なる高さにおける速度・温度・明るさの変化からEBの高さ方向への伝搬についての解析を行い、その形成・発展過程について考察をすることである。

以下、第2章に観測、第3章では解析方法・結果、第4章で議論、第5章ではまとめである。

## 2. 観測

観測対象を図1に示す。図1は京都大学飛騨天文台のSolar Magnetic Activity Research Telescope (SMART)で撮像されたH $\alpha$ 線中心から1.25 Å短い波長の画像である。上図は2022年10月16日の活動領域NOAA13124、下図が10月31日の活動領域NOAA13135である。右の画像は左図の黒枠内を拡大したもので赤枠内が解析対象である。

この観測対象を京都大学飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡(Domeless Solar Telescope : DST)の水平分光器を用いてH $\alpha$ 線(6562.8 Å)とCa II K線(3933.7 Å)の二つの波長で観測を行なった。観測概要は表1に示す。

## 3. 解析方法・結果

本研究では、H $\alpha$ 線とCa II K線での各速度、温度、明るさを導出した。それぞれの導出方法を述べるにあたり、以後使用する表記と物理量を表1に示す。

### 3.1. エラーマンボムの同定

エラーマンボムを分光観測すると、図2の左図の赤矢印にあるようなライン中心から両端に増光している画像となる。また、赤矢印のラインでプロファイルをとると右図のような分光プロファイルが得られる。縦軸が輝度、横軸が波長(Å)である。このような増光が確認できる分光画像を目視で見つけた。

今回の観測では各波長が同時に増光するエラーマンボムを観測できなかった。

### 3.2. H $\alpha$ 線の温度導出

H $\alpha$ 線の温度導出方法としてHong et al. (2014)が提案したTwo Cloud Modelを使用した。Cloud ModelとはBeckers (1964)によって考案されたモデルで、H $\alpha$ 線のコントラストプロファイルを用いて、彩層上空に浮かぶ雲の物理量を推定することができる。さらに、エラーマンボムでは下層大気特定の層では加熱が起きるが、彩層上部はほとんど加熱の影響を受けないことからHongは加熱領域と非加熱領域での2つの雲を用意するTwo Cloud Modelを提案した。

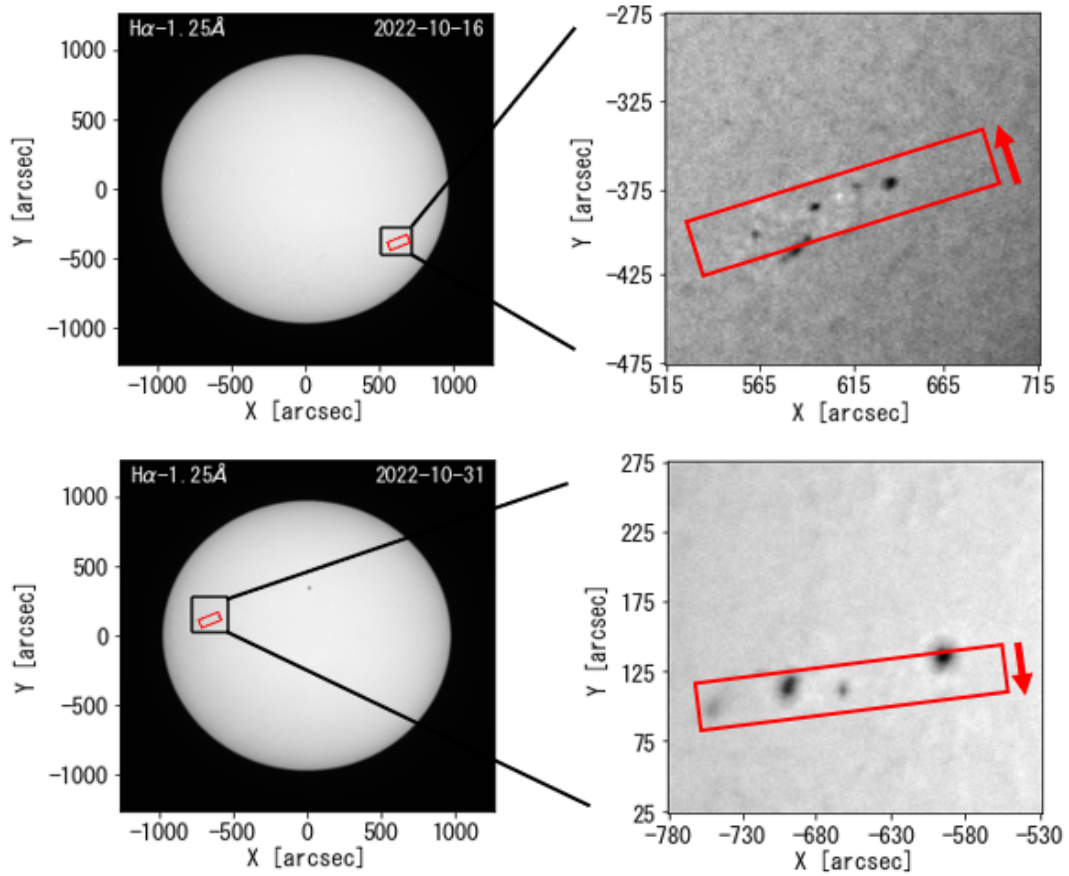
具体的な式として、観測によって得られるコントラストプロファイルに対して以下の式でフィッティングを行う。

$$C = \exp[-(\tau_L + \tau_U)] + \frac{S_L}{I_0} [1 - \exp(-\tau_L)] \exp(-\tau_U) + \frac{S_U}{I_0} [1 - \exp(-\tau_U)], \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tau_L = (1 - \alpha_L)\tau_{L,q} = (1 - \alpha_L)\tau_L^0 \frac{\delta^2}{\delta^2 + (\lambda - \lambda_L)^2}, \\ \tau_U = (1 - \alpha_U)\tau_{U,q} = (1 - \alpha_U)\tau_U^0 \exp[-(\frac{\lambda - \lambda_U}{W})^2], \\ S = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\frac{g_u}{g_l} \exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1}, \\ S_L = (1 - \beta)S_{L,q}. \end{cases} \quad (2)$$

ここで、添え字の「L」、「U」、「q」は下層雲と上層雲、静穏時のパラメーターを表す。パラメーターは $\alpha_U, \alpha_L, \beta, \tau_U^0, \tau_L^0, \delta, W, \lambda_U, \lambda_L, T_U, T_L$ の11つであるが、すべてを自由パラメーターにすると計算時間が大きくなるため、 $\alpha_U, \alpha_L, \beta$ 以外の各パラメーターに制限を設けた。 $\delta, W$ はプロファイルから0.3 Åから0.6 Åと0.2 Åから0.6 Åとし、 $\lambda_U, \lambda_L$ はプロファイルを6次関数近似した時の頂点位置を初期値とし、上限は設けなかった。 $L, T_U, T_L$ に関してはVAL-C静太陽モデル(Vernazza et al. 1981)から下層大気に対応する温度を300 kmから700 kmの高度に、上層大気に対応する温度を1500 kmから2000 kmの高度に対応する温度とした。 $\tau_U^0, \tau_L^0$ は先行研究からフィッティングへの寄与率が低いことが分かったため、先行研究と同様の0.4と0.2の固定値とした。

図3はTwo Cloud modelで求めたH $\alpha$ 線のウィング部の温度時間変動のグラフである。図にあるように、今回温度に関してはうまく導出できなかったため、議論の対象から外した。



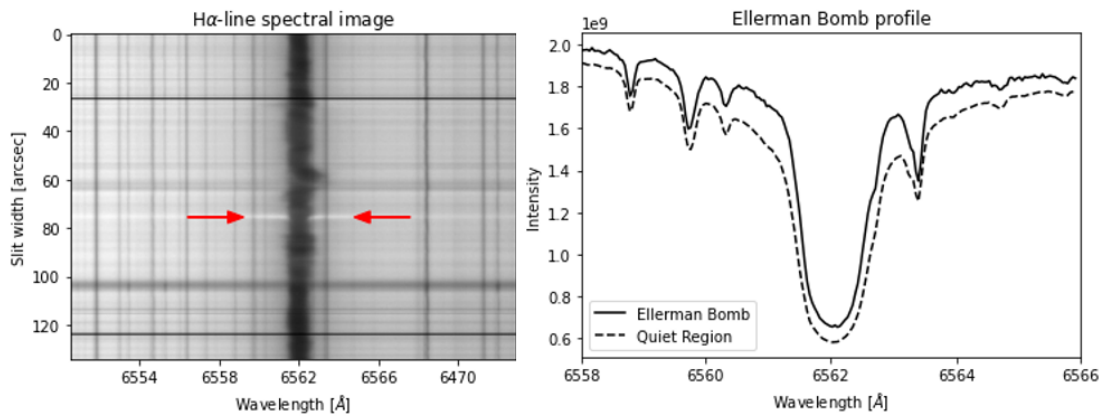
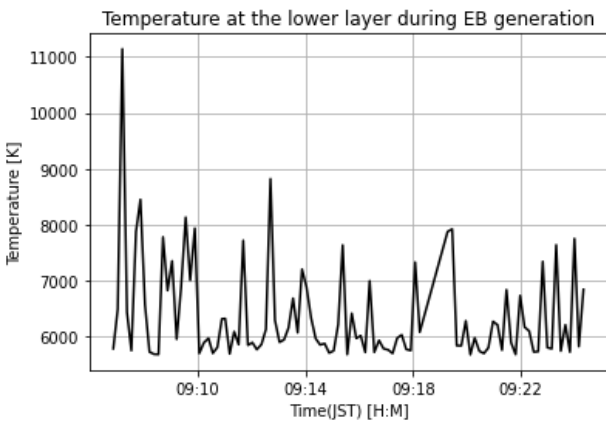
**Fig. 1.** Images taken on October 16, 2022 (top) and October 31, 2022 (bottom) at a wavelength  $1.25 \text{ \AA}$  short of the center of  $H\alpha$  observed with the Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART) at Kyoto University's Hida Observatory. The right figure is an enlarged view of the region indicated by the black frame in the left figure, The red frame is the slit-scan observation area.

**Table 1.** Observation summary

Date (JST)	2022, October-16 9:06-9:24	2022, October-31 10:32-10:50
Target	near NOAA13124	near NOAA13135
Camera	AVT Prosilica GE1650 (02-2075A-06004)	AVT Prosilica GE1650 (02-2075A-06052)
Pixel number	$800 \times 600$	$800 \times 600$
Center wavelength	$H\alpha(6562.808 \text{ \AA})$	$Ca \text{ II}K(3933.682 \text{ \AA})$
Spatial sampling	about $0.34 \text{ arcsec pixel}^{-1}$	about $0.32 \text{ arcsec pixel}^{-1}$
Wavelength sampling	about $0.04 \text{ \AA pixel}^{-1}$	about $0.018 \text{ \AA pixel}^{-1}$
Exposure time	0.06 sec	0.14 sec
Slit	$0.1 \times 50 \text{ mm}$	$0.2 \times 20 \text{ mm}$
Scan width	35 arcsec	35 arcsec
Scan time	10 sec	10 sec
Spectral images in one scan	about 56 images	about 56 images

**Table 2.** Notation and physical quantities to be used afterwards.

Notation	Physical quantities	Notation	Physical quantities
$S$	Source Function	$I_0$	Quiet Region Intensity
$\tau$	Opacity thickness	$\delta$	Damping constant [ $\text{\AA}$ ]
$W$	Doppler shift [ $\text{\AA}$ ]	$\lambda$	Wavelength [ $\text{\AA}$ ]
$h$	Planck constant	$c$	Light velocity
$b$	departure coefficients of the hydrogen atom at energy levels	$T$	Quiet Region Temperature [K]
$\alpha$	new parameter	$\beta$	new parameter

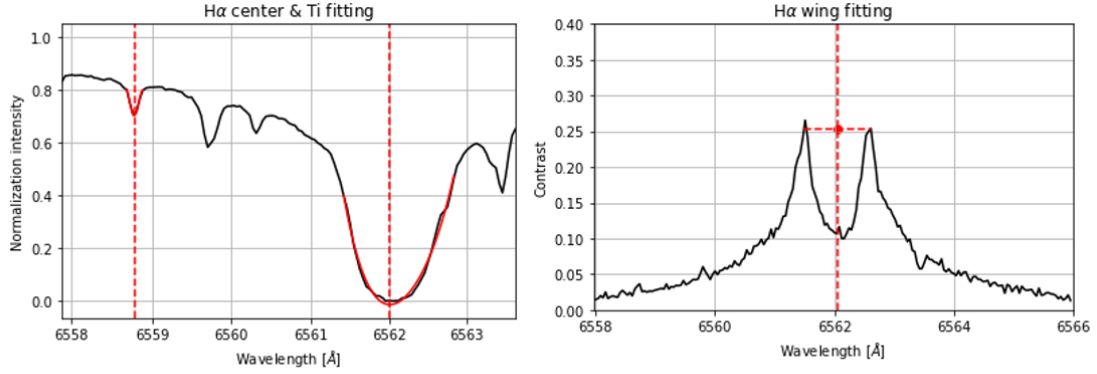
**Fig. 2.** The left figure is a  $H\alpha$ -line spectral image, and the red arrow shows an Ellerman bomb with a wing section that is intensified. The right figure shows profiles of Ellerman bomb (solid line) and quiet region (dashed line).**Fig. 3.** Temperature time variation within the altitude region of the  $H\alpha$  wing obtained by the TwoCloud Model.

### 3.3. $H\alpha$ 線のドップラー速度の導出

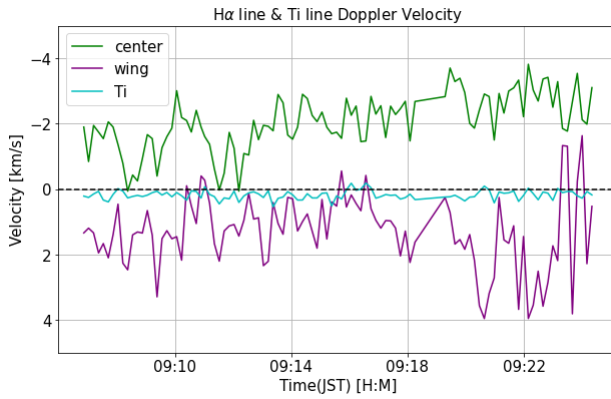
$H\alpha$ 線のドップラー速度導出では図4の右図のように、吸収線に対して4次関数でフィッティングを行いその頂点位置を求め、ドップラーシフト量を求め速度を導出した。ウィング部では左図のように静穏領域に対してのコントラストをとることでウィング部の増光部を顕著に表したプロファイルを生成し、パイセクター法を用いてウィング部のドップラーシフト量を求め速度を導出した。基準となる波長位置は観測ファイル(約30000枚)を時間空間平均して制作したプロファイルを同様のフィッティングを行って導出した。

図5が $H\alpha$ 線およびTi線のドップラー速度の時間変化である。横軸が時間で縦軸が速度。負の値の場合、太陽から湧き出るような上昇流を表している。緑色の線が $H\alpha$  center、紫色の線が $H\alpha$  wing、水色の線がTiの線の速度である。

センター部の速度が上昇流、ウィング部の速度が下降流であることから、今回発生したエーラーマンボムは各波長に対応した高度500 kmから1500 kmの間で発生し、その双方交流を観測したと考えられる。センター部とウィング部の速度に注目すると、センター部では時間が経つと強い上昇流に、ウィング部は速度が0に近づくような時間変化が確認できる。このことから、2つの可能性が考えられ、一つ目はリコネクションポイントが時間が経つと



**Fig. 4.** The right figure is the result of a quadratic function approximation of the central wavelengths of the H $\alpha$  and Ti lines. The red line is the fitting result and the dashed line is the vertex position. The left figure shows the Doppler shift of the wing area obtained by the bi-sectoral method in contrast with the background profile.



**Fig. 5.** Time variation of the Doppler velocity of the H $\alpha$  and Ti lines. The green line is the velocity time variation of the H $\alpha$  center, the purple line is the velocity time variation of the H $\alpha$  wing, and the light blue line is the velocity time variation of the Ti line. Negative velocities indicate an upwelling that seems to spring from the sun.

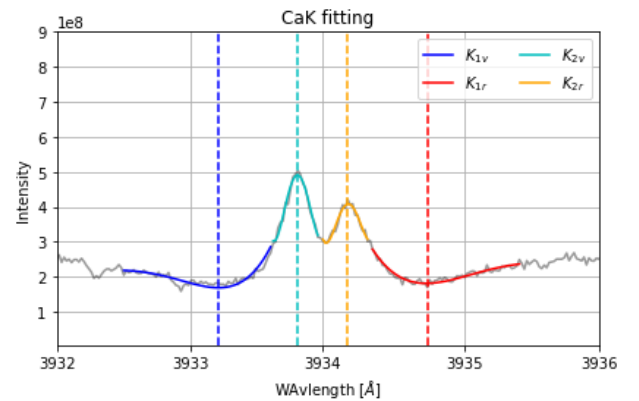
もに上昇した可能性。2つ目は、時間がたつにつれ、双方交流の上昇部だけ強くなっていき、逆に下降部は弱くなっていった可能性である。しかし、現段階ではこのどちらが正しいのかは判断できていない。

### 3.4. Ca II K線の温度導出方法

Ca II K線の温度導出方法は熱力学的平衡が保たれている  $K_1$ ,  $K_2$  に対してプランクの法則を適用した。

$$T_{EB} = \frac{hc}{k\lambda} \frac{1}{\log \left[ \frac{I_q}{I_{EB}} \left( \exp\left(\frac{hc}{kT_q\lambda}\right) - 1 \right) + 1 \right]} \quad (3)$$

具体的には、図6にあるように、各コンポーネントに対して4次関数でフィッティングを行いその頂点位置を求めた。求めた波長位置と同様の位置の背景プロフィールの輝度値も求め、その値を  $I_q$ ,  $I_{EB}$  に代入した。その後、短波長、長波長の温度を平均することで各コンポーネントで



**Fig. 6.** Results of fitting each component of the Ca II line individually. The dashed lines indicate the vertex position of each component..

の温度とした。ここで、 $T_q$  は静穏時の温度で、約500 km に対応する  $K_1$  では4000 K、約1000 km に対応する  $K_2$  では6000 Kとしている。

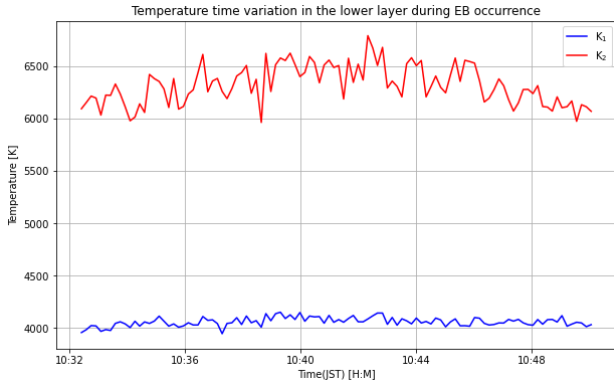
図7はCa II K線の  $K_1$   $K_2$  の温度時間変動のグラフである。 $K_2$  は静穏時よりも少し温度が上昇していることがわかるが、輝線を見ているためプランクの法則を適用していいかわからず、うまく議論ができなかった。

### 3.5. Ca II K線の速度導出方法

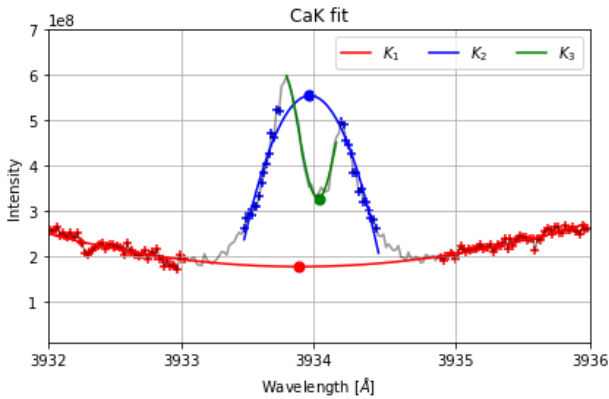
Ca II K線は  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  と3つの吸収線が重なった状態で観測される。そのため、速度導出では各コンポーネントに対して個別にフィッティングを行い各波長位置を求めた。具体的には、 $K_1$  をフィッティングする際には  $K_2$ ,  $K_3$  を除いた状態でフィッティングを行う(図8)。基準となる波長位置はH $\alpha$ 線と同様に観測ファイル内を時間空間平均したプロフィールとした。

図9がCa II K線のドップラー速度の時間変化である。横軸が時間で縦軸が速度。負の値の場合、太陽から湧き出





**Fig. 7.** Temperature time variation within the altitude region of the  $H\alpha$  wing obtained by the Two Cloud Model.



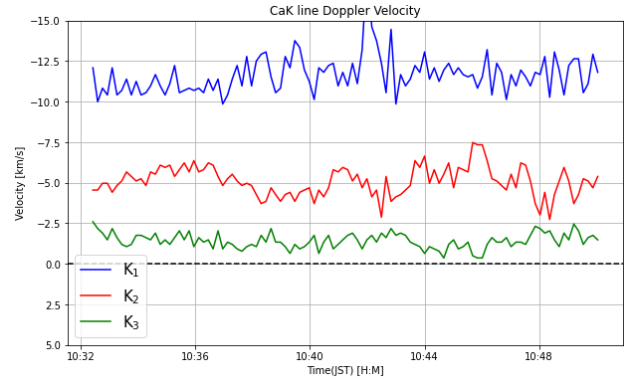
**Fig. 8.** Results of fitting only the individual components of the Ca II K line. The points plotted with + are the points used for fitting. The points plotted in circles are the vertex positions in the approximate curve.

るような上昇流を表している。緑色の線が $K_3$ 、赤色が線が $K_2$ 、青色の線が $K_1$ の速度である。 $K_1$ の速度が一番強い上昇流で、高度が上がるにつれて速度が0に近づくように減少していることから、今回発生したエラーマンボムは $K_1$ に対応する高度500 kmより低高度で発生したと考えられる。 $Ca II K$ 線では $H\alpha$ 線で確認できた速度の時間変化は確認できなかった。

## 4. 議論

### 4.1. $H\alpha$ 線 速度と輝度の相関

$H\alpha$ 線のウィング部に速度と輝度の相関が確認できた。図10は $H\alpha$ 線のウィング部での速度時間変化(上図)、輝度時間変化(中図)、ウィング部のシフト時間変化(下図)を縦に並べたものである。ここで、ウィング部のシフトとはコントラストをとった時の短波長側のピーク値から長波長側のピーク値を引いたもので、短波長側が優勢(値が0以上)の場合は上昇流、長波長側が優勢の場合は下降流傾向であることを示している。それぞれ、時間変化の流れを見やすくするために1分間の移動平均を図示してある。図から、光度が増加すると少し遅れて速度が上昇流になり、



**Fig. 9.** Doppler velocity time variation of the Ca II K line. The green line is the  $K_3$  velocity time variation, the red line is the  $K_2$  velocity time variation, and the blue line is the  $K_1$  velocity time variation. Negative velocities indicate an updraft that seems to spring from the sun.

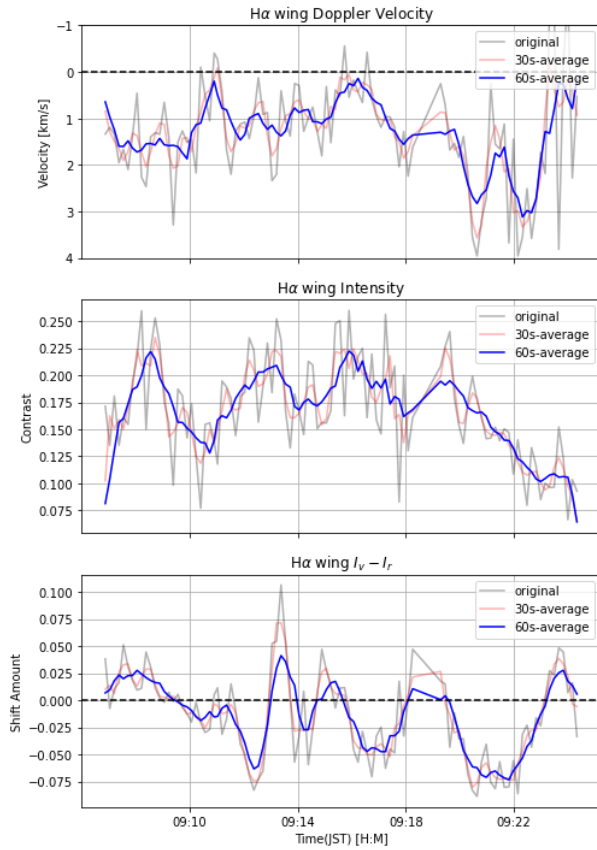
逆に光度が減少すると少し遅れて速度が下降流になる様子が確認できる。これは、エラーマンボムが光ったタイミング、すなわち磁気リコネクションが発生したタイミングで光度に変化が現れ、それによって発生した上昇流がタイムラグを生じて現れることを示している。光度が減少したタイミングは、磁気リコネクション発生の間隔にあたる時間帯のため磁気リコネクションによる上昇流が発生しておらず、相対的に下降流として現れる。また、ウィングのシフトの時間変動図のほうが実際のドップラー速度時間変動より、顕著にこの傾向が現れている。これは、16日の観測領域が太陽中から西に約40度ずれているため、視線方向で考えるとエラーマンボムを斜めから観測したことによる。よって、視線方向速度では実際の速度より低下した状態で観測されるため、シフトの時間変動に比べて上昇、下降の変動が小さかったと考えられる。

### 4.2. $Ca II K$ 線 速度と輝度の相関

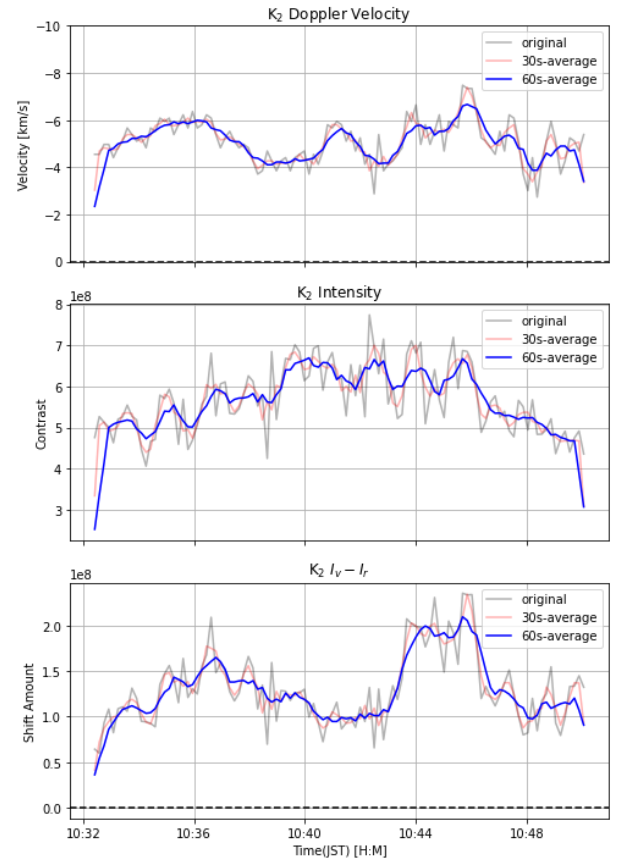
図11は $Ca II K$ 線の $K_2$ での速度時間変化(上図)、輝度時間変化(中図)、ウィングのシフトの時間変化(下図)を縦に並べたもの。それぞれ、時間変動のおおまかな動きが見やすいように1分間の移動平均を図示してある。 $Ca II K$ 線では、速度と輝度(上図と中図)に強い相関が見られなかった。これは、31日のエラーマンボムが $K_2$ コンポーネントより $K_1$ コンポーネントに近い位置で磁気リコネクションが発生したため、磁気リコネクションにより発生した光度と $K_2$ コンポーネントの光度変化が直結していないためと考えられる。なので、相関を見るにはより磁気リコネクションに近い $K_1$ コンポーネントの時間変動で相関を確認しないといけないが、 $K_1$ コンポーネントでは増光が小さいため、細かい時間変動が確認するのが難しく弱い相関関係しか確認できなかった。

## 5. まとめ

本研究では、飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡の水平分光器を用いてエラーマンボムの多波長同時分光観測を行い、その高度を細分化した時の物理量の時間変動につ



**Fig. 10.** Correlation between Ha line velocity and intensity. From top to bottom, the time variation of velocity, intensity, and shift of the wing section are shown. One-minute moving averages are taken to make it easier to see the large trends in time variation.



**Fig. 11.** Correlation between K2 line velocity and intensity. From top to bottom, the time variation of velocity, intensity, and shift of the wing section are shown. One-minute moving averages are taken to make it easier to see the large trends in time variation.

いて解析を行った。観測波長はH $\alpha$ 線とCa II K線である。今回の観測ではH $\alpha$ 線とCa II K線が同時に増光している様子が観測できなかったため、それぞれの波長で増光したエラーマンボムを個別に解析した。

H $\alpha$ 線で増光が起きた10月16日のエラーマンボムでは光球から300 km上空の彩層下部に対応するウィング部では上昇温度は300 Kから2000 Kの範囲であった。ドップラー速度ではウィング部で下降流、ライン中心では上昇流だったため、16日のエラーマンボムは高度300 kmから1500 kmの間で磁気リコネクションが発生したと考えられる。また、速度が時間が立つにつれ上昇流に変化していく様子が確認できたが、これは磁気リコネクションが時間が立つにつれて上空に移動したためだと考えられる。彩層底部のウィング部では速度と光度に相関がみられたが、これは増光するタイミングで磁気リコネクションが発生し、少し遅れて上昇流を速度として観測したためである。シフトの時間変動に比べて、ドップラー速度の時間変動での相関が小さかったがこれは観測領域が太陽中心からずれていたため、視線方向速度が低下したためと考えられる。先行研究に比べ上昇流の値が小さいのもこのせいであると考えられる。以上の点から磁気リコネクションは彩層下部で発生しているというモデルを考察した(図12)。

Ca II K線で増光が起きた10月31日のエラーマンボムでは、光球から1000 km上空の彩層中部に対応するK $_2$ コン

ポーメントで1500 Kから2500 Kほどの上昇温度が得られた。ドップラー速度ではK $_1$ , K $_2$ , K $_3$ コンポーネントと、観測高度が高くなるごとに上昇流が弱くなることから、31日のエラーマンボムは高度500 kmより低い高度で磁気リコネクションが発生したと考えられる。K $_3$ コンポーネントでは速度が0なので、エラーマンボムは高度2000 kmの彩層上部に届かなかといえる。Ca II K線では速度と光度に相関が弱かったが、これはK $_2$ コンポーネントよりK $_1$ コンポーネント近くで磁気リコネクションが発生したため、K $_2$ コンポーネントの光度は磁気リコネクションの発生と直結した変動をしなかったためと解釈した。

## References

- Beckers, J. M. 1964, Ph.D. Thesis, University of Utrecht, 49, 131  
 Chen, P. -F., Fang, C., & Ding, M. -D. 2001, Chin. J. Astron. Astrophys., 1, 176  
 Chae, J., Moon, Y. -J., & Park, S. -Y. 2003, J. Korean Astron. Soc., 36, S13  
 Ellerman, F. 1917, ApJ, 46, 298  
 Georgoulis, M. K., Rust, D. M., Bernasconi, P. N., & Schmieder, B. 2002, ApJ, 575, 506  
 Honoux, J. -C., Fang, C., & Ding, M. D. 1998, A&A, 337, 294  
 Hong, J., Ding, M. D., Li, Y., Fang, C., & Cao, W. 2014, ApJ, 792, 13

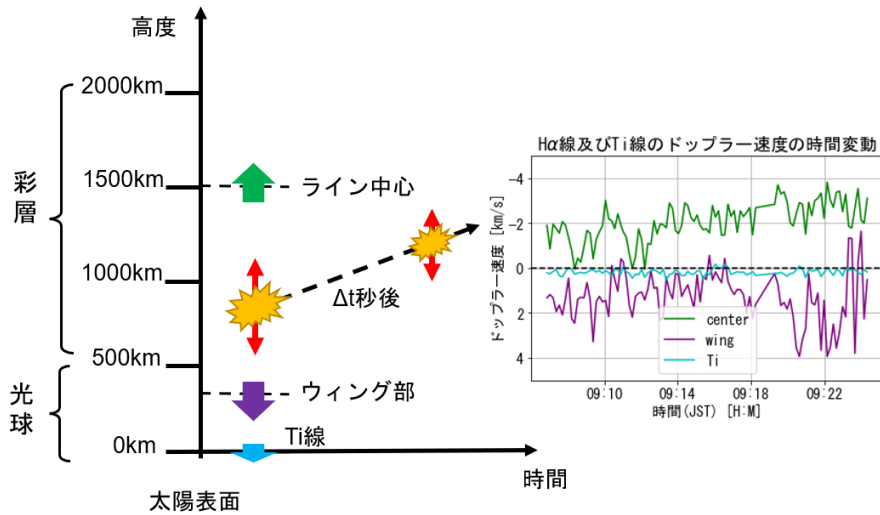


Fig. 12. Possible EB generation model based on velocity change.

- Isobe, H., Tripathi, D., & Archontis, V. 2007, *ApJ*, 657, L53
- Kitai, R., 1983, *SoPh*, 87, 135
- Kurokawa, H., Kawaguchi, I., Funakoshi, Y., & Nakai, Y. 1982, *SoPh*, 79, 77
- Lin, J., Ni, L., Zhu, B., Li, L., & Li, Y. 2019, American Geophysical Union, Fall Meeting 2019, SH33D3421
- Matsumoto, T., Kitai, R., Shibata, K., Otsuji, K., Naruse, T., Shiota, D., & Takasaki, H. 2008, *PASJ*, 60, 95
- Pariat, E., Aulanier, G., Schmieder, B., Georgoulis, M. K., Rust, D. M., & Bernasconi, P. N. 2004, *ApJ*, 614, 1099
- Pariat, E., Schmieder, B., Berlicki, A., Deng, Y., Mein, N., López Ariste, A., & Wang, S. 2007, *A&A*, 473, 279
- Severny A. B. 1968, *Mass Motions in Solar Flares and Related Phenomena*. Proceedings of the 9th Nobel Symposium, ed. Y. Ohman (New York: Wiley), 71
- Vernazza, J. E., Averett, E. H., & Loeser, R. 1981, *ApJS*, 45, 635