

Solar-Stellar Connection in X-ray Emitting Coronae

鈴木 建 (京大 理)

1 はじめに

太陽に代表される中小質量の主系列星の周囲には、コロナと呼ばれる温度が100万度を越えるプラズマが、普遍的に存在していることが知られている。また、主系列を離れた星のうち、準巨星段階にあるものからは、X線が観測されており、コロナ(もしくはフレア活動)が存在していることが分かっている。星が更に進化を続けると、やがてX線の放射が観測されなくなる。同時に質量放出率は急激に大きくなり、恒星の進化とともに、コロナが消失し冷たい恒星風段階に入ると考えられている(Linsky & Haisch 1979)。

これらの星に共通しているのは、表面对流層が存在していることである。対流層があれば、必然的に磁場が生成されるであろう。具体的に太陽では、光球付近で平均的に1-10ガウスの磁場が存在している。この磁場強度から導出される磁気圧は、ガス圧の1/100程度以下であるが、上空に行くと重力による束縛の影響によりガス圧は急激に減少するのに対し、磁気圧の減少は緩やかである。結果として上空では、磁気圧がガス圧に比べて卓越する。具体的に太陽では上空2000km(太陽半径の0.3%)で磁気圧はガス圧を約100倍卓越している。このような磁気圧卓越環境下では、ほんの少し磁場のエネルギーが散逸するだけで、ガスにとっては莫大な加熱となる。すなわち、表面对流層のエネルギーを磁場を通して上空まで持ち上げ、何らかの過程で磁気エネルギーを減衰させることが出来れば、コロナ加熱と恒星風の加速は達成されそうである。

恒星表面の磁場構造は大きく2つに分けられる。1つは閉じたループ構造、もう1つは外側の領域まで開いた領域である。電離したガスは基本的に磁力線に沿って運動する。従ってループ構造ではガスが束縛されるのに対し、開いた領域では恒星風となり周囲に吹き出すであろう。本研究では、磁場構造が開いた領域における、ガスの加熱(コロナの形成)と加速(恒星風の吹き出し)を統一的に考える。

磁場構造の開いた領域における加熱、加速過程において、少なくとも太陽では、アルフベン波が重要な役割を果たしている¹。光球に突き刺さった磁力線が足元の擾乱により振られて、アルフベン波が励起される。上空へ伝搬するに従い、波動は容易に非線形になる²。その結果、様々な非線形効果により波動が減衰し、周囲のガスを加熱、加速されることが考えられる。このような非

¹太陽の閉じた磁場領域では、磁力線のつなぎ換えも重要である

²静止した媒質中では、波はエネルギーフラックス $\propto \rho \delta v^2 v_{ph}$ を保存するように伝搬する。但し、 ρ は密度、 δv は波の振幅、 v_{ph} は位相速度(ここではアルフベン速度)。恒星大気を上方へ伝搬する波動では、周囲の密度が急激に下がるので、振幅がその分増大する。位相速度がさほど変わらないとすると、波動は容易に非線形、 $\delta v/v_{ph} \gtrsim 1$ 、になる。

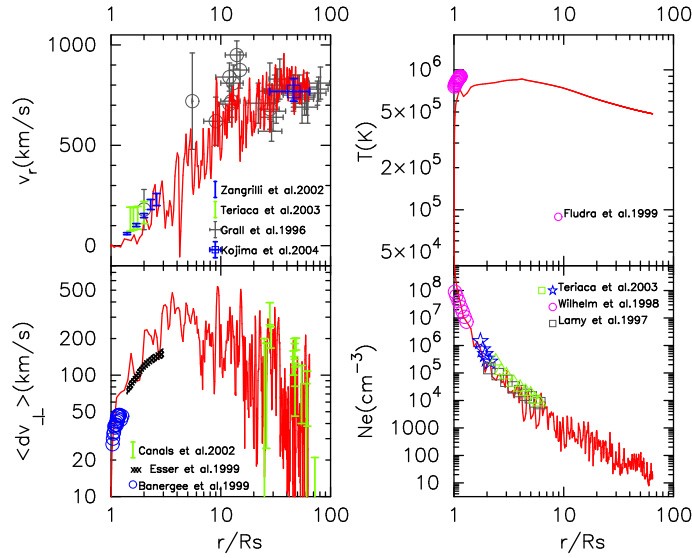


図 1: 高速太陽風領域のシミュレーション結果と観測値の比較

線形過程の解析には、数値シミュレーションが強力な手段となる。本稿では、アルフベン波の伝搬、減衰、プラズマ加熱を首尾一貫して扱った、1次元磁気流体シミュレーションの結果を述べる。

2 平均的な太陽風

一般の恒星について考える前に、基準となる平均的な太陽コロナと太陽風についての結果を紹介する (Suzuki & Inutsuka 2005)。1次元の磁束管において、光球表面から粒状斑の乱流速度程度の擾乱を与える。図 2 は準定常状態になった後の太陽風構造と、観測値を比較したものである。表面から注入されたアルフベン波は圧縮性波動へのモード変換を通した、非線形過程により非常に効果的に減衰し、結果としてコロナと遷音速太陽風を自然に再現した (詳細は Suzuki & Inutsuka 2005; 2006 を参照のこと)。

3 太陽風の消失 – 遷音速解の普遍性 –

前章では、観測されている振幅程度の擾乱を、太陽表面から与えた。もし、この振幅が変化したらどうなるであろうか？ 特に表面からのエネルギー注入が小さい場合、太陽風は遷音速構造を保つであろうか？ 実際過去に、太陽風の質量流速が 1/100 程度になったこともあり (Le et al. 2000)³、このような現象との関連を調べる上でも重要である。そこで、表面の擾乱の振幅を

³”太陽風の消失イベント”などと呼ばれている。

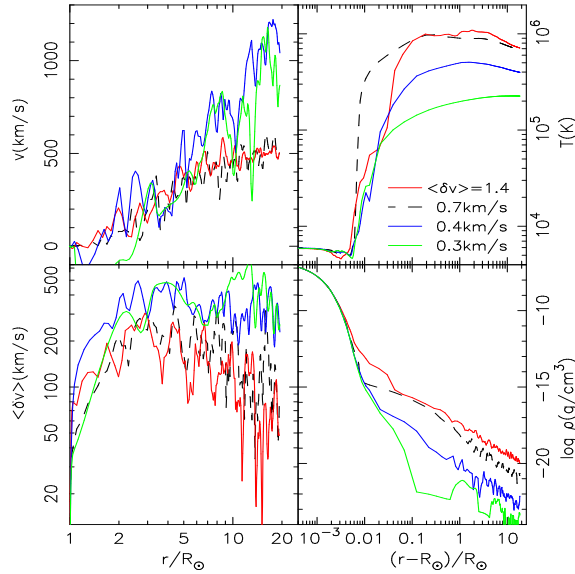


図 2: 表面から与える振幅を変化させた場合の、太陽風構造の変化

$\delta v = 0.3 - 1.4 \text{ km/s}$ 程度に変えて、太陽風がどのように変化するかを調べた。図 3 は、振幅が小さくなるにつれて、加熱が減ってコロナの温度が低くなることを示している。 $\delta v = 0.3 \text{ km/s}$ の場合は、温度は 20 万度程度となり、もはやコロナとは呼べないくらい低温になっている。温度が小さくなると、急激に下向きの熱伝導のフラックスは小さくなり、彩層蒸発によるコロナへの質量の供給が抑えられる。そして、コロナとそこから吹き出す太陽風の密度は、振幅の低下にともない、急激に減少しているのが分かる。振幅を 4-5 倍程度しか変えていないのに、コロナの密度 (と太陽風の質量流速) は、1 万倍程度変わっている。しかし、振幅を小さくした場合でも、太陽風は超音速まで加速されているのが分かる。これは、アルフベン波駆動型の恒星風では、遷音速解が普遍的に安定であり、注入されるエネルギーの変化は、太陽風の密度の変化のみにより調整されることを示している。

4 コロナの消失と急激な質量放出率上昇

次に、恒星が進化して赤色巨星となった場合、周囲のコロナはどのように進化するかを調べる。ここでは太陽質量の星が標準的な恒星進化路に沿って進化した場合を考える。図 4 は、恒星進化に伴い半径が膨張し、表面重力が 4.4 (太陽)、3.4、2.4、1.4 と変化した時の外層の様子である。表面重力の値が 4.4 と 3.4 の場合は高温のコロナが形成されているが、2.4 の場合は温度が数万度程度、1.4 では大部分が数千度となり、コロナが消失することが見てとれる。対して、密度は急激に上昇する。結果として、質量放出率 ($\propto \rho v r^2$) は恒

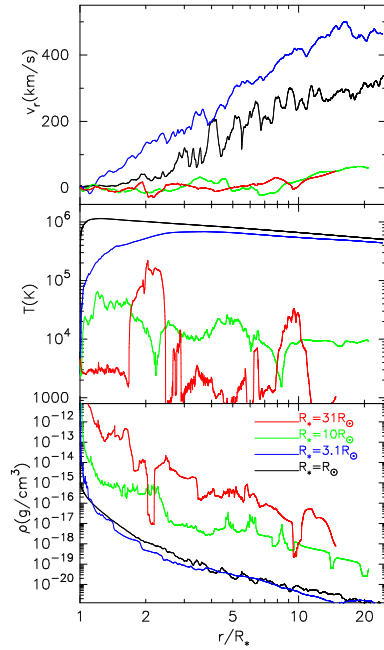


図 3: 太陽質量の恒星が進化に伴う、外層の恒星風構造の変化。横軸は恒星半径で規格化してある。

星進化とともに、急激に大きくなり、コロナの消失と同時に、冷たい恒星風段階に入ることを示している。

コロナが消失する理由は、半径の膨張に伴う表面重力の減少により、高温コロナが束縛できなくなためである。具体的に、重力加速度が 1.4 の場合の脱出速度は約 110km/s であり、 100 万度のプラズマに対応する音速 150km/s よりも小さくなるため、周囲のガスが加熱されると、自らのガス圧で逃げていってしまうことが出来る。実際は加熱される前に、そのまま吹き出してしまい、質量放出率の大きな恒星風となるのである。

参考文献

- [1] Le, G., Russell, C. T., & Petrinec, S. M. 2000, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1827
- [2] Linsky, J. L. & Haisch, B. M. 1979, *ApJ*, 229, L27
- [3] Suzuki, T. K. & Inutsuka, S. 2005, *ApJL*, 632, L49
- [4] Suzuki, T. K. & Inutsuka, S. 2006, *JGR*, submitted