

「ひので」がみた黒点のエバーシェッドフロー



一本 潔 and 「ひので」チーム

〈京都大学大学院理学研究科附属天文台 〒506-1314 岐阜県高山市上宝町蔵柱 飛騨天文台〉

e-mail: ichimoto@kwasan.kyoto-u.ac.jp

太陽黒点のエバーシェッドフローは発見されてから 100 年になるが、その起源がまだ解明されない不思議な現象である。「ひので」の可視光望遠鏡はその優れた解像度により、黒点半暗部の微細構造とエバーシェッドフローの空間的な関係を明らかにした。すなわち、エバーシェッドフローは半暗部のほぼ水平な狭い磁場チャンネルに沿って音速に近い速度で流れる激しい現象である。また、個々のフローチャンネルには暗部側に光球深部からの高温ガスの湧き出し、外周側に沈み込みの領域を伴うことを明らかにした。「ひので」は半暗部フィラメントの不思議な「ねじれ」運動や、頻発する半暗部彩層ジェットなど予期せぬ現象も新たに発見した。エバーシェッドフローの真の理解には磁気流体シミュレーションによるさらなる研究が必要であるが、「ひので」の観測結果は黒点という現象の理解に向けた大きな 1 ステップをもたらしたといえる。

1. はじめに—エバーシェッドフローの発見—

若干マニアックなタイトルであるが、黒点の「エバーシェッドフロー」はそれを知る者には多少なり心に引っかかっている問題ではないかと思う。太陽フレアやプロミネンスのように派手な現象ではない。しかし、フレアやプロミネンスが同じような状況で発生したりしなかったりするのに対し、エバーシェッドフローは黒点の半暗部（黒点中央の暗い部分を取り囲む少し明るい部分）には必ず存在する、きわめて必然的（であるはずの）現象なのである。むしろ、エバーシェッドフローがあることによって半暗部ができているとすら考えなくなる。それにもかかわらず、その流れのメカニズムや黒点の成長・崩壊に果たす役割がまだわかっていないところにもどかしさを覚える。

エバーシェッドフローは今からちょうど 100 年

前（1909 年）、インドのエバーシェッドによって発見された¹⁾。太陽黒点に強い磁場を見いだしたヘールの発見²⁾の翌年のことである。黒点が太陽円盤の中心からはずれたところに位置するとき、そのスペクトルを観測するとリム側の半暗部は吸収線の赤方変移、太陽の中心側の半暗部は青方変移を示す。これはドップラー効果による波長のシフトと考えることができ、半暗部のガスが黒点の暗部から外へ向かってほぼ水平に流れ出していると解釈することができる。空間的に平均したときの流れの速度は 1-2 km/s 程度である。黒点の竜巻説（竜巻によってダストが集まり光を遮る）が有力だった当時において、渦状の運動ではなく放射状の運動が黒点に発見されたことは少なからぬ驚きをもって迎えられたようだ。

スペクトル線のゼーマン効果によって黒点の磁場が精密に測られるようになると、半暗部の磁場は平均 40 度程度の仰角で太陽面に対して立っていることがわかってきた。したがってほぼ太陽面

に沿った水平なエバーシェッドフローは一見この磁場を横切って流れていることになる。一方電気伝導度のよい太陽大気的气体は、磁場を横切って移動することができない(磁場のプラズマへの‘凍結’)。仮にエバーシェッドフローが磁場を‘引きずって’外へ流れているとすると、黒点の磁場はあっという間になくなってしまう。これは永年エバーシェッドフローのパラドックスとされた。

2. 「ひので」前

この困難を回避するため、エバーシェッドフローは本当のガスの流れではなく、外に向かって伝わる波だとする説が唱えられたりしたが、真の解決の糸口は地上観測の進展による空間分解能の向上によってもたらされた。黒点の半暗部を0.2–0.3秒角の分解能で観測すると、半暗部が明暗の放射状の細い筋構造(フィラメント)からできていることがわかる(図1左)。そしてエバーシェッドフローもこれと同じ空間スケールで筋状に局在していることがわかってきた。さらに分解能の高いマグネトグラム(視線方向磁場の強度マップ)が得られると、磁場の太陽面に対する仰角もまた同じ空間スケールで黒点の周方向に変化していること、エバーシェッドフローは磁場がほぼ水平な筋に沿って流れていることがわかってきた³⁾。そして現在広く支持されている半暗部の構造モデル

(図1右, 埋め込み磁束管モデル)が登場することになる⁴⁾。流れが磁場に沿っていることから、上のパラドックスはひとまず解決され、エバーシェッドフローが半暗部の微細構造と密接に関係していることが明らかになった。

しかしながら、基本的な話になるとわからないことが多い。たとえば、エバーシェッドフローは明暗の筋のどちらを流れているのか? という問いに対しては、暗い筋, 明るい筋, いや相関はないという異なる観測結果が次々と報告され, かなり混乱した状況となった。また, エバーシェッドフローはどこから流れ出し, どこへ消えていくのか? 一つ一つの流れ要素に対してこれを同定することはきわめて難しい。エバーシェッドフローは, 半暗部の明るさを賄うエネルギーを運んでいるのだろうか? 黒点では強い磁場によって対流運動が抑制されており, 静穏領域の75%ほどある半暗部の明るさを説明するのは, 実はなかなか難しい問題なのである。エバーシェッドフローをドライブしている力は何であろうか? ガスの圧力とする考えが優勢であるが, これにも複数の説がある。一つはエバーシェッドフローの湧き出し口はフローの終端よりも磁場が弱く, その分ガス圧は湧き出し口のほうが高いとする説(コーヒーの抽出方式であるサイホンと似ていることからサイホンフロー説⁵⁾と呼ばれる), もう一つは, 半暗

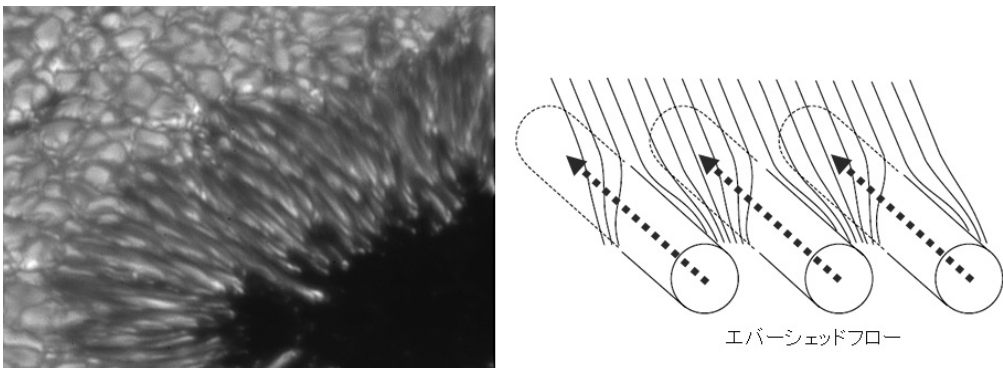


図1 黒点半暗部の連続光画像(左,「ひので」による)と半暗部の埋め込み磁場モデル(右)。エバーシェッドフローは光球に埋め込まれた水平な磁力線に沿って流れると考えられている。

部は対流不安定であることから深部から磁束管が浮上し、上昇してきた磁束管内の熱いガスが、その圧力によって押し出されるとする説（上昇磁束管説⁶⁾）である。いずれも磁力線に沿った1次元のガス流れを扱っているが、それをもたらす3次元的な構造を説明するものではない。では半暗部の筋構造の起源は何であろうか？ 埋め込み磁束管モデルでは半暗部の明るさを説明できないことを根拠に、これを真っ向から否定する対流説（半暗部の明るい筋は磁場を伴わない高温ガスが下から顔をのぞかせたものとするギャップモデル）も登場し⁷⁾、諸説紛々で合意した理解にはほど遠い状況である。

2006年9月23日、太陽観測衛星「ひので」が誕生した*1。黒点微細構造の研究にとって、新しい高分解能観測がまさに待望されているときであった。可視光望遠鏡⁸⁾は、0.2秒角という空間分解能で画期的に安定した時系列画像を提供した（フィルターグラフ）。またこの分解能にして初めて 10^{-3} という精度の偏光スペクトルデータをもたらし、これまで不可能だった空間スケールの物理量診断を可能とした（スペクトロポラリメーター）。すこし前置きが長くなった。では「ひの

で」がみたエバーシェッドフローをご紹介しよう。

3. エバーシェッドフローの空間構造

「ひので」によって得られた黒点の連続光画像のムービーをみると、エバーシェッドフローが半暗部のどこを流れているのか、直ちにそのヒントが浮かび上がってくる。すなわち、半暗部のガスは暗部に近い明るいフィラメントの先端から出発して外へ向かって勢いよく流れ出し、黒点の外縁に近づくにつれて逆に暗い筋を流れているように見える。一つの明るいフィラメントに注目すると、その先端はゆっくりと黒点の中心に向かって移動していくが、フィラメントの中のガスは、その輝度むらの変化から、6 km/s 程度の速さで外へ流れ出していくのがわかる。

これが見かけのものでなく本当の運動であることは、スペクトロポラリメーターで得られるスペクトル線のドップラーシフトの情報から確かめることができる。図2の3枚の絵は黒点が太陽中心から約17度程西に位置していたときの連続光強度、吸収線のドップラーシフト、磁場の視線方向からの傾きである。まず、それぞれの物理量が半

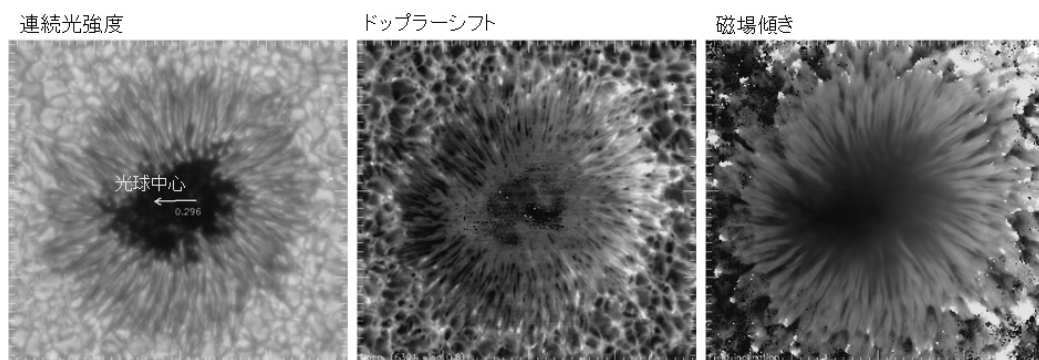


図2 2007.3.2の黒点（光球中心から約17度）。左から連続光強度、ドップラーシフト、磁場の視線方向からの傾き。連続光画像内の矢印は光球中心の方向を示す。ドップラーシフトは白が赤方変移、黒が青方変移、磁場の傾きは半暗部で色の薄いところがおおむね磁場が太陽面に対して水平なところに対応する。

*1 2006年9月23日、Solar-B衛星はM-V7号機によって内之浦宇宙空間観測所から打ち上げられ、太陽同期軌道に投入後「ひので」と命名された。

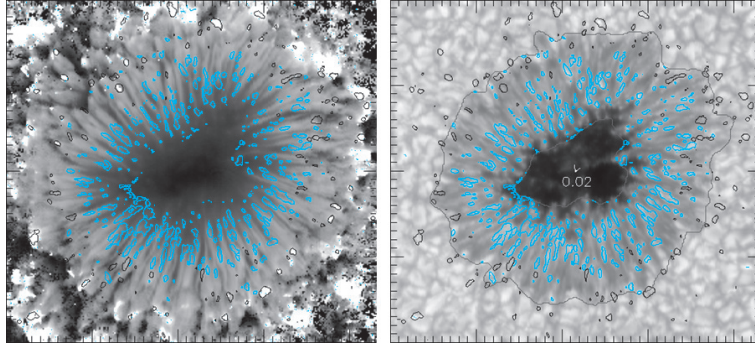


図3 2007. 2. 28 の黒点（光球中心から約1度）。左は磁場の視線方向からの傾きにドップラーシフトをプロットしたもの。右は連続光強度にドップラーシフトをプロットしたもの。青のコンタは -0.8 km/s の上昇流、黒は下降流を伴う反対磁場極性の領域を示す。

暗部で細い筋状に分布しているのがわかる。ドップラーシフトは光球中心側の半暗部ではすべての筋が青方変移，リム側では赤方変移をしている。そして連続光強度とドップラーシフトの相関を調べることで、上で見た明暗のフィラメントとエバーシェッドフローの関係，すなわち内部半暗部では明るい筋を流れ外部半暗部では暗い筋を流れる，ということを確認することができる。また，磁場の傾きと速度場の相関から，エバーシェッドフローは磁場の水平なフィラメントに沿って流れていることも確認できる。これは半暗部の明暗構造とエバーシェッドフローの関係に関する永年の論争に終止符を打つとともに，磁場の傾きと流れの関係をベクトル磁場の測定によって初めて直接的に示したものである⁹⁾。

この黒点がちょうど光球の中心に位置していたとき（2007年2月28日，中心からの角度 ~ 1 度）

のデータは，黒点内の上昇・下降運動を調べるのに最適である。スペクトロポラリメーターによるドップラーシフトのマップは，半暗部内の至る所に非常に小さな（ ~ 0.3 秒角）上昇流（ $\sim 1 \text{ km/s}$ ）が点在することを明らかにした。また，黒点の外縁付近には，黒点とは反対の磁場極性をもつ大きな下降流（ $4\text{--}7 \text{ km/s}$ ）が散在するのが発見された。図3左は磁場の傾きのマップに，これら上昇・下降流領域をコンタとして重ねたものである。これからわかるように，磁場の水平な筋，すなわちエバーシェッドフローの流れるチャンネルに沿って，暗部側に上昇流が外周側に下降流領域が並んでいるのがわかる。「ひので」はついに一つのエバーシェッドフローの湧き出しと沈み込みを同定したのである。

図3右は連続光強度マップに上昇・下降運動領域を重ねたものである。半暗部内の明るい構造

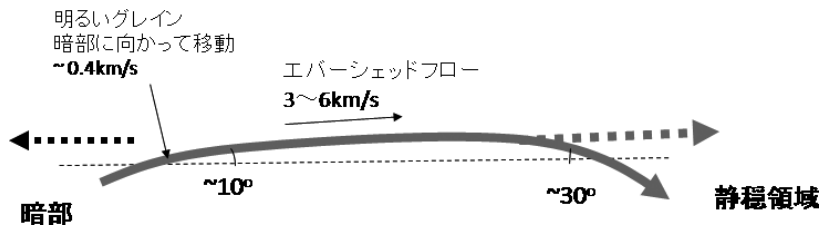


図4 「ひので」が明らかにしたエバーシェッドフローチャンネルの空間構造。

(ブライツグレインと呼ばれる)が見事に上昇流と対応しているのがわかる。これは、半暗部の輝度を維持するためのエネルギーをエバーシェッドフローが運んでいることを強く示しているといえる。

以上の観測結果から、エバーシェッドフローの要素について図4のような絵を描くことができる。これはおおむね上昇磁束管モデル⁶⁾、すなわち、熱い磁束管が浮力で上昇し、表面に熱を運ぶと同時にガス圧でエバーシェッドフローを駆動するという描像を支持する結果である。

4. 半暗部フィラメントの不思議な‘ねじれ’

黒点の連続光ムービーを眺めているともう一つ不思議な現象に気がつく。すなわち、エバーシェッドフローの湧き出し口である明るいフィラメントの多くがねじれ、くるくると回転しているように見えるのである。図5左は、フィラメントを横切るスリットに沿った輝度の時間変化を表し

ている。明るいフィラメントが、時間方向にねじれた縄のように見えるのは、見かけの回転運動を表している。そしてこの視野の中にあるフィラメントはすべて同じ向きの回転を示している。複数の黒点の解析から、そのような「ねじれ」運動は黒点が太陽円盤のどこに位置しているかに依存していることが見いだされた。すなわち「ねじれ」運動はいつも半暗部の一部、太陽の中心と黒点を結ぶ線から直角方向の半暗部にみられること、さらに回転の向きはフィラメントの輝度むらがりム側から光球中心のほうへ移動する向きであることが発見されたのである(図5右)。したがって、これは個々のフィラメントが本当に回転しているのではなく、視線の角度に依存した見かけの現象であると結論できる¹⁰⁾。いったい何をみているのであろうか? 明るいフィラメントの先端で高温ガスが上昇し、外側に流れ出しながら冷却・下降する一連の運動のなかで、このような見え方がつくられると筆者らは考えているが、ちゃんとした説明は輻射輸送を考慮した3次元磁気流体シミュ

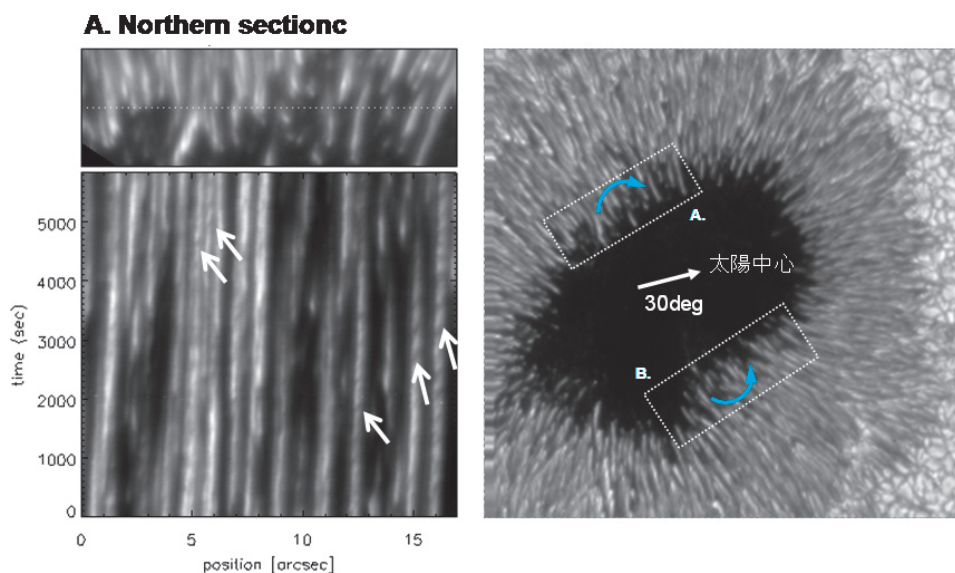


図5 フィラメントのねじれ運動。フィラメントを横切るスリットに沿った空間-時間プロット(左)とフィラメントの見かけの回転方向(右)。空間-時間プロットでは明るいフィラメントがねじれ方が縄のように見える(矢印)。

レーションの進展を待たなければならないだろう。

5. みえてきた半暗部の3次元構造

黒点半暗部の吸収線の偏光スペクトルは、しばしば非対称なゆがんだ輪郭を示す。これは、大気中のガスの運動や磁場が視線方向に沿って変化していることが原因だ。したがって、観測された偏光スペクトル輪郭のひずみから、逆に視線方向に沿った（深さ方向の）速度・磁場構造を推定することが可能である。図6はこのような方法で再現した、半暗部フィラメントの断面構造（温度、磁場、速度）である¹¹⁾。これから、エバーシェッドフローは光球の深いところに埋め込まれ、温度が高く、水平な磁場領域に閉じ込められていることがわかる。フロー領域の磁場は周りよりも弱くなっているが、磁場の強さとフロー速度の関係については、スペクトル線の偏光輪郭から、逆の関係があるという証拠も報告され¹²⁾、今後論争になるところだと筆者は考えている。

ひので可視光望遠鏡によるカルシウムH線(389.6 nm)の画像は、上層の希薄な大気(彩層)の様子をとらえている。これによって半暗部の上空には短命(<1分)な微細ジェット現象が頻発

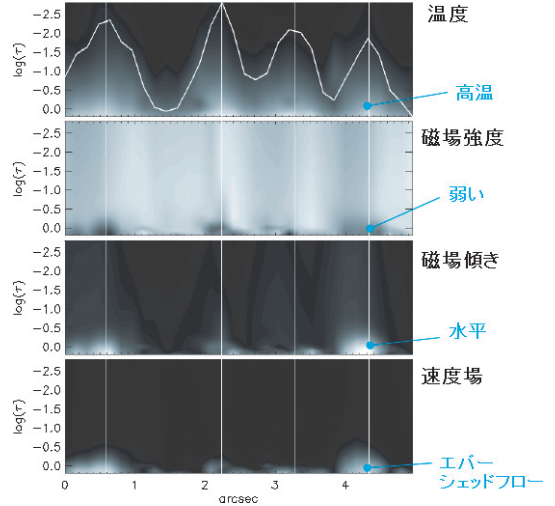


図6 偏光スペクトル輪郭の詳細解析による半暗部の断面構造。縦軸は光学的厚みで下ほど深いところに対応する。深部に閉じこめられたエバーシェッドフロー領域の特徴を示した。

しているのが発見された(図7¹³⁾)。これは半暗部の傾きの異なる磁場の筋構造が接するところで磁気リコネクションが発生し、エネルギーが解放されているのではないかと考えられている。このように、これまで全く予期しなかったような現象も発見されつつ、図1に示したような半暗部磁場の3次元的な構造が明らかになってきた。

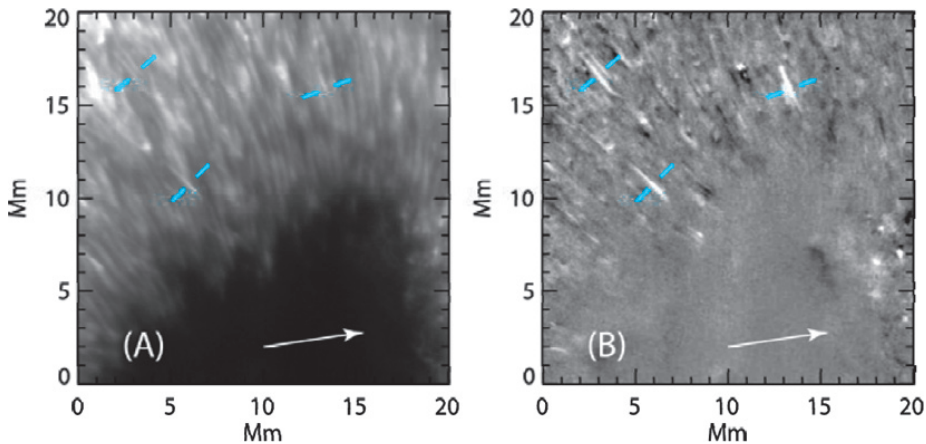


図7 黒点半暗部の彩層に発見された微細ジェット現象。左はカルシウム線のフィルターによる画像、右は平均画像を引いてコントラストを強調したもの。矢印は光球中心の方向を示す。

6. 結 び

黒点の半暗部は強い磁場と対流不安定なプラズマがからみ合った、磁気流体現象の格好の実験室である。エバーシェッドフローの運ぶエネルギー(エンタルピーフラックス)は、粗い見積もりをすると黒点暗部がブロックするエネルギーの何分の1かに匹敵しうるものとなる。このことは、黒点の熱力学的安定性にとってもエバーシェッドフローが無視できない存在であることを示唆している。また黒点の成長や崩壊過程は、エバーシェッドフローも関与する磁場の輸送過程が深くかかわっていると考えられている。このようにエバーシェッドフローや半暗部を理解することは、黒点そのものの理解にとって欠かせないことだと考えられるのである。

「ひので」の可視光望遠鏡はかつてない安定した画像によって、これまで曖昧だった半暗部の微細構造とエバーシェッドフローの関係を明らかにした。そしてエバーシェッドフローは狭いチャンネルを5-7 km/sといった、光球での音速に匹敵する速度で光球深部から流れ出す激しい現象であることもわかった。おそらく衝撃波を伴って光球に再突入しているのではないかと思われる。しかし、半暗部微細構造の起源やエバーシェッドフローの駆動力といったより本質的な問題については、答えが見つかったとはまだ言い難い。また、半暗部フィラメントの不思議なねじれの振舞いや、頻発する彩層微細ジェットなど、新たな謎も生み出した。磁気流体力学モデルの構築によって今後説明がなされるべき課題である。

「ひので」の今後の観測についていえば、一つ一つの要素的構造の発生から消滅までの時間発展を追跡し、黒点の成長・崩壊過程において微細スケールで起こっているプロセスをつぶさに調べることが必要である。これから始まる次期太陽活動期に向けた課題はまだ多く、さらに多くの成果が得られることが期待される。

参 考 文 献

- 1) Evershed J., 1909, MNRAS 69, 454
- 2) Hale G. E., 1908, ApJ 28, 315
- 3) Title A. M., et al., 1993, ApJ 403, 780
- 4) Solanki S. K., Montavon C. A. P., 1993, A&A 275, 283
- 5) Thomas J. H. and Motesinos B., 1993, ApJ 407, 398
- 6) Schlichenmaier R., Jahn K., Schmidt H. U., 1998, A&A 337, 897
- 7) Scharmer G. B., Spruit H. C., 2006, A&A 460, 605
- 8) Tsuneta S., et al., 2008, Solar Phys. 167
- 9) Ichimoto K., et al., 2007, PASJ 59, S593
- 10) Ichimoto K., et al., 2007, Science 318, 1597
- 11) Jurcak J., et al., 2007, PASJ 59, S601
- 12) Ichimoto K., et al., 2008, A&A 481, L9
- 13) Katsukawa Y., et al., 2007, Science 318, 1594
http://hinode.nao.ac.jp/Column/HSC_SciCol_03/

Evershed Flow Revealed by the Solar Optical Telescope aboard Hinode

Kiyoshi ICHIMOTO and 「Hinode」 Team

Kwasan and Hida Observatories, Graduate School of Science, Kyoto University, Hida Observatory Kurabashira, Kamitakara-cho, City of Takayama, Gifu 506-1314, Japan

Abstract: The Evershed flow, which was discovered about 100 years ago, is still a mystery on its origin. The Solar Optical Telescope (SOT) aboard Hinode revealed the fine scale structure of the Evershed flow and its relation to the filamentary structures of the sunspot penumbra; The Evershed flow is confined in narrow channels embedded in deep penumbra that have nearly horizontal magnetic fields. It is a dynamic phenomenon with the flow velocity close to the sound speed of the photosphere, and individual flow channels are associated with tiny upflow of hot gas (source) at the inner end and down flow (sink) at the outer end. SOT/Hinode also discovered the enigmatic twisting motions of penumbral filaments and numerous tiny jets in the penumbral chromosphere. The SOT opened a new step towards the understanding of the sunspots, though further studies with magnetohydrodynamic modeling are necessary.