

野辺山電波ヘリオグラフと SOHO/EITによるコロナホールと 高速太陽風の研究



秋山幸子

〈The Catholic University of America, Washington, D.C. 20064, USA〉

e-mail: sachiko.akiyama@nasa.gov

コロナホールは高速太陽風の源である。特に低緯度に出現したコロナホールは、その大きさと地球近傍での太陽風の速度が線形相関を示すことが知られている。電波ではコロナホールが明るく見える電波増光現象が観測されるが、太陽風との関連は不明であった。そこで高速太陽風起源の磁気嵐21例について、SOHO衛星搭載の極紫外線遠望鏡画像と野辺山電波ヘリオグラフ17 GHzのデータを用いて、コロナホールおよび電波増光と太陽風の関係を調べた。その結果、コロナホールだけでなく電波増光にも、その大きさと太陽風の速度に正の相関が見られた。またコロナホールを、電波増光がある領域とない領域に区別し、それぞれの大きさと太陽風の速度について調べた。結果として、電波増光がある領域は太陽風速度とより強い相関を示すことを発見した。上記の研究結果はコロナホール下層の電波増光現象が、高速太陽風の発生と密接に関連していることを示唆している。

1. はじめに

X線や極紫外線で太陽コロナを観測すると、しばしば極域などで、極端に輝度が低く、周囲に比べて暗い領域が見受けられる。これは明るいコロナに黒い穴が開いているように見えることから、コロナホール (Coronal Hole; CH) と呼ばれており、高速太陽風が吹き出す場所であることが知られている。

1.1 コロナホール発見の歴史

このコロナホールについては、その発見にまつわる興味深い話がある。それはコロナの観測が確立される以前、1930年代の頃から、地球に周期的な磁気嵐やオーロラの発生もたらず要因として、その存在が予測されていたことである。この磁気嵐は、太陽の自転と近い周期で観測されていた。そこで太陽黒点やフレアとの関連が調べら

れたが、良い結果を得ることはできなかった。温度の低い光球や彩層では、コロナホールと他の領域の境界は目立たない。それゆえその当時の観測技術ではコロナホールの存在を確認することは非常に困難だったのである。

1960年代後半、コロナを撮像できるロケットおよび人工衛星によってコロナホールが発見されると、その物理的特徴と地球への影響が大いに注目された。特に1973-74年にコロナの定常観測を初めて行ったスカイラブ衛星、1994-95年に極域を含む全緯度からの太陽風を観測したユリシーズ衛星は、多くの重要な成果を残している。

1.2 コロナホールの特徴

コロナホールの最も興味深い特徴とは、その磁場構造であろう。一般的に太陽表面から出る磁力線は別の場所で再び太陽内部へと戻り、閉じた磁力線構造を形成する。この磁力線ループに捕らえ

られた高温プラズマがコロナ大気を明るく輝かせている。

対してコロナホールは、磁力線の多くが太陽内部へ戻らず、惑星間空間へ伸び出ている。この開いた磁力線の足元は、領域内ですべて同じ極性を示すため、内部の微小な閉じた磁気ループは目立たず、一見するとコロナホールは単極磁場を形成しているように見える。そしてプラズマは開いた磁力線に沿って、高速太陽風として流れ出ていくため、密度・温度共に低く、暗い領域として観測されるのである。

コロナホールは、他の太陽の現象と同様に、約11年の周期で、その大きさや出現緯度を変化させることが知られている。コロナホールは常に極域に存在しているような印象があるが、実のところ極大期では、ほとんど極域で観測されなくなる。その代わりに、中・低緯度に、小さなコロナホールが複数発生する。そして太陽活動が弱まるにつれ、高緯度にもコロナホールが再出現し、徐々に中緯度から低緯度へと、その出現緯度と大きさを上げていく。特に極小期に近くなると、一方の極から連なり、赤道を越えて発達するような大規模なコロナホールもしばしば観測される。地球公転面に近い赤道付近にコロナホールが位置した場合、コロナホールからの太陽風が地球へ及ぼす影響がより大きくなる。

1.3 光球や彩層でのコロナホール

コロナでは、周囲とのコントラストによってその存在が際立つコロナホールも、より温度の低い下層になると、様子が様変わりする。境界が非常に曖昧になり、光球や彩層だけの観測では、存在さえ特定することが難しくなる。長い間コロナホールが発見されなかった理由もここにある。したがってこれらの層におけるコロナホール独自の特徴には、いまだ不明確な点も多い。それでもコロナホールと重なり合う領域で以下のようないくつか興味深い特徴が報告されている。

1) 単極磁場増加領域：絶対値を用い、光球

磁場の極性を無視できる状態にして、コロナホールの足元と周囲の静穏領域を比較すると、概して前者の方が磁場強度の平均値が高くなる。一般的に、コロナでは磁場の強い場所がより明るく見える。したがってコロナホールの輝度が周囲に比べて半分以下しかないことを考慮すると、面白い現象である。

2) 電波増光 (Microwave Enhancement; ME): 電波観測では、コロナホールの領域とおおまかに重なり合う場所で、輝度温度が全体的に高くなる傾向がある^{1),2)}。その形状や大きさは、コロナ大気中で見られるコロナホールとは異なることが多い。約1万度の彩層大気を観測する野辺山電波ヘリオグラフによる解析では、電波増光が彩層の網目構造の形状と、時間および空間的に一致した振る舞いをするのが報告されている³⁾。さらに単極磁場増加領域としばしば重なり合って観測される。平均的な電波増光の大きさは、極紫外線から求められたコロナホールの面積の、約3割ほどである⁴⁾。

1.4 高速太陽風と地球への影響

コロナホールを源とする高速太陽風の速度は、地球近傍で、およそ700–800 km/sにも達する。また低緯度に位置するコロナホールは、その面積と太陽風の速度が線形相関することがわかっている⁵⁾。つまり、大きいコロナホールほど、速い太陽風を発生させるのである。これはコロナの磁場フラックスの膨張率が、太陽風速と逆相関するためと考えられている⁶⁾。また最近の観測では、コロナホールの明るさと太陽風の速度が反比例すると報告されている⁷⁾。

ところで太陽風には、高速流以外に300–400 km/sの低速流が存在し、活動領域に近接した場所に存在する開いた磁力線が、この流れの起源であると考えられている^{8),9)}。したがって極小期では、低緯度に大きなコロナホールと活動領域が同時に存在するので、惑星間空間に、低速流と高速流が入り乱れる。そして地球へ到達する太陽風の速度構造は、より複雑になることが予測されるのである。

高速太陽風が前方の遅い流れを追い越す場合を考えてみよう。速度の異なるプラズマの境では、太陽風の圧力が高く、磁場強度が強い領域が形成される。これを共回転相互作用領域 (Corotating Interaction Region; CIR) と呼ぶ。この圧縮領域が地球磁場とぶつかり、そのとき CIR 内の磁場が強い南方向成分をもっていると、地球磁気圏の北向き磁場と磁力線のつなぎかえが生じ、地球で磁気嵐が観測されることとなる。

コロナホールの大規模なものは、3-5カ月以上も同じ場所に存在する。そして約27.5日という太陽自転周期ごとに、太陽座標系の経度 0° 、つまり太陽子午線を通過する。このときに吹き出す高速太陽風は地球方向へ向いているため、最も地球に影響を与える。これがコロナホール発見以前から観測されていた周期的な磁気嵐の原因だったのである。

1.5 CIRとコロナ質量放出

ところで、地球に磁気嵐を引き起こす要因は、高速太陽風による CIR だけではない。むしろ大規模な磁気嵐はコロナ質量放出現象が主な原因として知られている。1996-2005年に発生した Dst 指数^{10),*1}が -100 nTを下回るような、大きな磁気嵐88個のうち、CIR起源はわずか13%で、残りはすべてコロナ質量放出現象と関連していた¹¹⁾。ただし、太陽活動極小期に限れば、この結果も変わってくる。極小期、フレアは規模も発生数も減少するので、必然的に地球に影響を及ぼすコロナ質量放出現象の総数も減る。一方 CIR は、黄道面に近い低緯度にコロナホールが出現するようになり、結果 CIR 起源の磁気嵐が増えることとなる。基本的に CIR 関連の弱い磁気嵐は、太陽におけるその発生源を同定することが難しい。しかし極小期近くの静穏な惑星間空間なら、比較的簡単に高速太陽風の伝播を推測でき、太陽表面のコロナホールとそこから流れ出た高速風、および CIR に

よる磁気嵐を特定することが可能である。

1.6 研究の目的

本研究は、地球に磁気嵐を発生させた高速太陽風と低緯度コロナホールおよび電波増光の関係を調べる。低緯度コロナホールの面積は高速太陽風の速度と比例している。電波増光はコロナホールとは形や大きさが異なるが、電波増光に対しても、面積と太陽風の速度との法則が成り立つのかを検証する。

2. 観 測

本研究で使用する CIR 起源の磁気嵐は、二通りの方法で選出した。一つは、1996-2005年の間に発生した CIR 起源の大規模な磁気嵐 (Dst ≤ -100 nT) 11例中、その高速太陽風の源であるコロナホールが正確にわかっている10例^{11),12)}。もう一つは、太陽活動極小期である1996年に発生した、CIR 関連の小-中規模の磁気嵐 (Dst > -100 nT) 37例中¹³⁾、発生源と推測できるコロナホールが、太陽面低緯度に観測できた11例のイベントである。

次に、集められた磁気嵐から、関連する高速太陽風と、その発生源であるコロナホールおよび電波増光の求め方について説明する。図1は、1996年10月21-25日の (a) Dst 指数、(b)-(d) Wind 衛星の Solar Wind Experiment (SWE) で観測された太陽風の速度、密度、温度、(e)-(h) Wind 衛星の Magnetic Field Investigation (MFI) による、総磁場と磁場の x, y, z 方向成分を GSE (Geocentric Solar Ecliptic) 座標系で表したものである。また図1の点線は CIR の開始と終了時刻を表し、解析で用いる太陽風の速度はこの間の最高値とした。そしてコロナホールの磁場に相当する、太陽風磁場の x 方向成分は、密度の最大値から速度の最大値までの時間 (図1(f) の灰色部分) の平均とする。GSE 座標系の x 軸は、地球から見て太陽

*1 地球赤道付近で観測された平均的な地磁気変動量から算出した地磁気変動指数。磁気嵐の指標として用いられる。
単位は nT (ナノテスラ), $1 \text{ nT} = 10^{-5} \text{ G}$ 。

へ向かう方向が正の値となる．したがって太陽面での磁場の符号とは逆になり，このイベントでは，コロナホール磁場の極性はプラスであることがわかる．

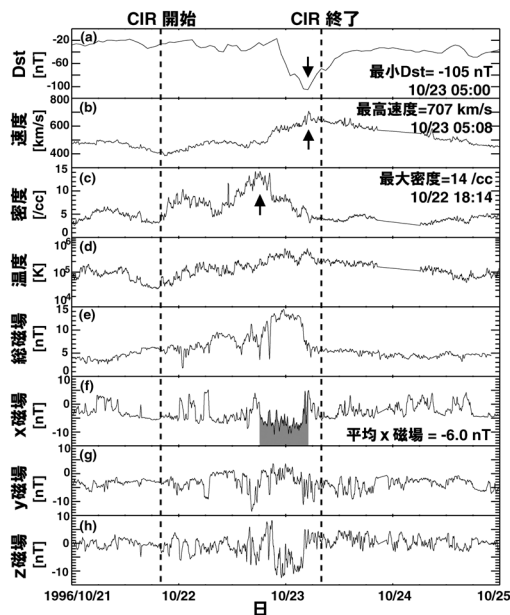


図1 CIRによる磁気嵐と惑星間空間の物理量．(a) Dst指数．(b)-(h) 太陽風速度，密度，温度，総磁場，磁場のx, y, z成分をGSE座標系で表したものの．

図1(a) より，Dst指数の最小値である -105 nTは，1996年10月23日05 UTに観測されていることがわかる．低緯度コロナホールから吹き出した高速太陽風が地球に到達するのに平均して74時間かかる．そこで磁気嵐の発生時刻から48-120時間前の期間内で，経度 $\pm 30^\circ$ 以内にあるコロナホールの総面積が最大になる時間をコロナホールの子午線通過時刻とした．この時刻の画像をコロナホールと電波増光の領域の定義に用いる．

図2は磁気嵐から約3日前の1996年10月20日06:21 UTに撮像された太陽面中心付近の部分画像である．図2(a)と(b)はそれぞれ，SOHO衛星搭載のMichelson Doppler Imager (MDI) による光球面磁場データと，Extreme-ultraviolet Imaging Telescope (EIT) による 284 \AA 極紫外線画像である．また図2(c)は野辺山電波ヘリオグラフ17 GHz画像となっている．

コロナホールが太陽面中心付近に位置するとき，地球は最もその影響を受ける．そこでコロナホールの各値と太陽風の比較を容易にするために，太陽中心から 30° 以内にあるコロナホールと電波増光を解析に使用する．図2(b)と(c)に，太陽中心から半径 30° の円を青線で表す．

コロナホールはコロナ大気中では周囲より暗い．

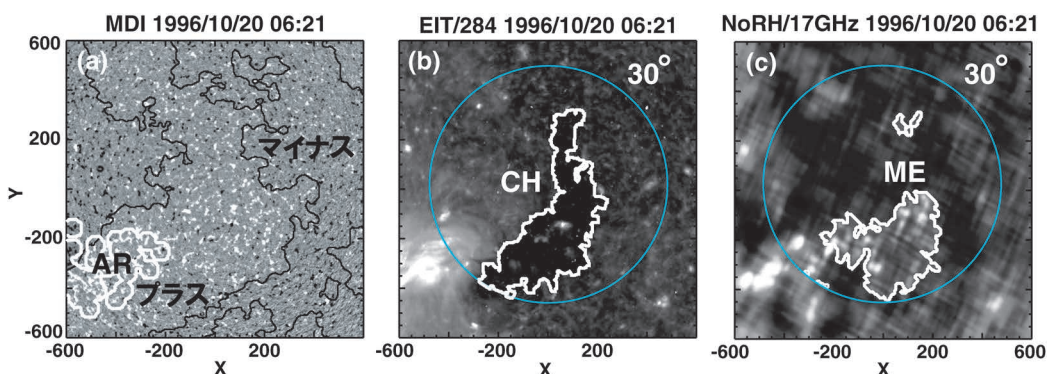


図2 1996年10月20日の低緯度コロナホール(CH)と電波増光(ME)．(a) SOHO/MDI磁場データ．黒線は巨視的観点からの磁場の境界，白線は活動領域(AR)の場所を表す．(b) SOHO/EIT 284 \AA 画像．白線はコロナホールとして選択された領域．(c) 野辺山電波ヘリオグラフ17 GHz画像を電波増光が見やすいように画像処理したデータ．白線は電波増光の領域．(b), (c)に，CIR起源の磁気嵐と関連が強い場所として，太陽中心から 30° 以内の領域を青線で示す．

したがってコロナホールの領域は、あるしきい値より輝度が低い場所と定義することができる。本研究では、しきい値を太陽表面輝度の中央値の半分とした。ただし、巨視的観点ではコロナホールは単極磁場構造をしているので、コロナホールの主極性（図2の例では、プラス磁場）と反対の極性の場所は、選択領域から除外する。図2(a)の黒線は、巨視的磁場構造の極性の境界を示している。さらに、コロナホールの縁に暗いフィラメントが位置する場合も、フィラメント領域はコロナホールから取り除く。上記の条件で選択された領域をコロナホールとして、図2(b)に白線で示す。このコロナホールの面積および、平均輝度と平均磁場強度は、 $7.9 \times 10^{10} \text{ cm}^2$, 1.29 DN^* , 7.3 G であった。

一方電波増光は、電波画像で周囲よりやや明るい領域として観測される。ただしコロナホールと比較すると、その増光の境界は曖昧でわかりにくいので、画像処理を行わずかな輝度温度の強弱をわかりやすくしている（図2(c)）。そして電波増光の領域は、コロナホールの定義に用いた手法と同様に、あるしきい値より高い輝度温度を示す場所と定義した。電波増光のしきい値は、表面輝度温度の中央値の3/4倍である。この場合、電波増光以外にも輝度温度が高い活動領域は選択範囲から取り除く。図2(a)にMDI磁場データから求めた活動領域の場所を白線で示す。最終的に、図2(c)の白線で囲まれた領域が、解析で用いる電波増光である。電波増光の面積および平均輝度温度と平均磁場強度は、 $5.7 \times 10^{10} \text{ cm}^2$, 10448 K , 8.9 G であった。

3. 低緯度コロナホールと電波増光

3.1 高速太陽風との関係

X線や極紫外線観測による低緯度コロナホールの面積は、高速太陽風の速度と正の相関があることが知られている。図3(a)と(b)はコロナホー

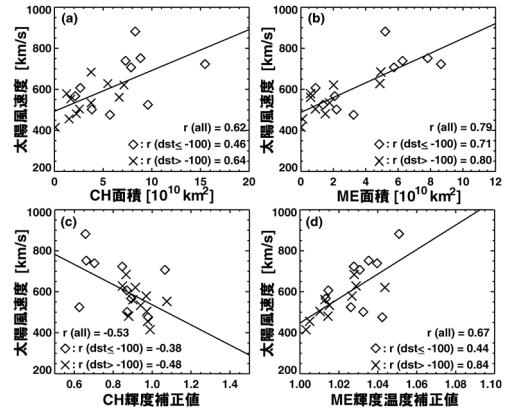


図3 低緯度コロナホールと電波増光の面積 (a), (b) と輝度補正地 (c), (d) に対する太陽風速度。

ルおよび電波増光の面積と高速太陽風の速度の関係を表している。相関係数は、それぞれ0.62と0.79で、どちらも正の相関があることがわかる。図3(a)は過去の研究を追認する内容であるが、図3(b)は興味深い新しい結果である。コロナホールとその下層の電波増光は形やサイズが異なることが多く、コロナホールの境界を形作る開いた磁力線が、そのまま下層で電波増光の境界になっているわけではない。それにもかかわらず図3(b)の関係が成り立つということは、電波増光は物理機構に不明な点が残るものの、彩層におけるコロナホールの特徴の一つであることが、強く裏づけられたと言える。

図3(c)と(d)はコロナホールと電波増光の輝度および輝度温度を補正した値と、太陽風の関係を表したものである。太陽コロナの明るさは、その活動度に依存して大きく異なる。コロナホールも極大期と極小期で、その平均輝度は3倍以上異なるという。そこで太陽活動度が異なるイベントを正しく比較するために、コロナホールと電波増光を定義したときに用いた敷居値で、平均輝度を割り、その値を補正している。図3(c)はコロナホールの明るさと太陽風の速度が逆相関をして

*2 Data Number. CCD1ピクセルあたりに入射したX線強度の単位。

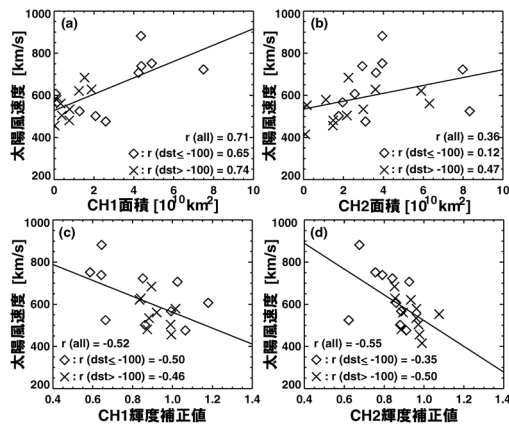


図4 CH1 (MEと重なるCH領域)とCH2 (MEと重ならないCH領域)の面積 (a), (b) および輝度補正值 (c), (d) に対する太陽風速度.

おり ($r = -0.53$), 過去の結果に倣うものである. 一方, 図3(d)の電波増光については, 相関係数が0.67で正の相関をしている. つまり, コロナホールは暗いほど, 電波増光は明るいほど, 速い太陽風が吹いていることがわかる.

さらに図3で興味深いことは, コロナホールと電波増光を比べた場合, そのサイズも明るさも, 太陽風との相関は電波増光のほうが良いということである. これはコロナホール内部でも, 高速太陽風の源となる場所は領域によって差があり, 電波増光と一致する部分がより重要な働きをしているのではないかと推測される.

そこでコロナホールの中で電波増光と重なる領域 (CH1) と重ならない領域 (CH2) を分け, 高速太陽風との比較を行った. 図4(a) と (b) はそれぞれCH1とCH2の大きさと太陽風の速度を比較したものである. 図4(a) は図3(a) と比べると, 相関係数が0.62→0.71に上がっている. 一方, 図4(b) は0.62→0.36に下がる. つまりコロナホールは電波増光と重なり合う場所が, 高速太陽風とより密接な関係をもっていることがわかる. 次に図4(c) と (d) に, CH1とCH2の, 輝度および輝度温度と太陽風速度の関係を示す. 両図とも図3(c)と同様に逆相関をしており, その

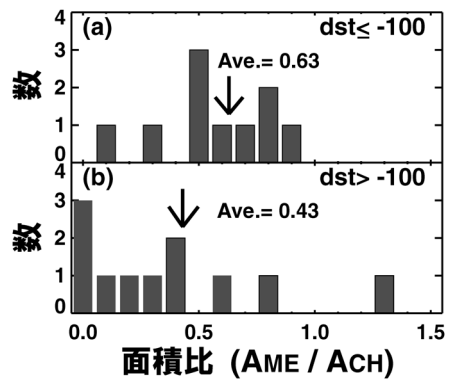


図5 CHに対するMEの面積比ヒストグラム. (a) 大規模 ($Dst \leq -100$) と (b) 小-中規模 ($Dst > -100$) の磁気嵐に関連するイベント.

相関係数も大きな違いは見られない. つまりコロナホールの輝度に関しては, ほとんど差は見受けられず, 電波増光を発生させる機構は, コロナの明るさには全く影響を及ぼさないことがわかる.

3.2 コロナホールと電波増光のサイズ比

図3より電波増光の大きさも太陽風の速度と比例することがわかった. 極小期に観測された電波増光を用いた過去の研究では, その平均的なサイズは, コロナホールの大きさの33%と報告されている⁴⁾. 本研究は, コロナホールに対する電波増光の大きさの平均が0.55と, 以前の結果より大きい値となった. そこで図5(a)に大規模, 図5(b)に小-中規模の磁気嵐に関連する, コロナホールと電波増光の面積比のヒストグラムを示す. 平均値は図5(a)と(b)でそれぞれ0.63と0.43であり, 大規模な磁気嵐と関連したイベントのほうが, コロナホールと比較して大きい電波増光現象だったことがわかる. また図5(b)の面積の比は, 最小値 (0.07) から最大値 (1.31) まで幅が広く, 分散が大きい. 図5(b)の面積比が大きい2例は, “Elephant Trunk” (象の鼻) コロナホールとして有名な, 北極域から赤道を越えて南半球まで発達した巨大なコロナホールであった. 太陽風速度も, 図5(b)のイベント中, 最も速い (628 km/s と 684 km/s). したがって小-中規模磁

気嵐グループの中では、特殊なコロナホールのイベントとして、分けて考えられるかもしれない。そして上記のイベントを除外した場合、図5(b)のヒストグラムの平均値は0.30とより小さくなり、磁気嵐の規模に対する差が明確になる。つまりコロナホールに対する電波増光の面積比が、コロナホールから吹き出す太陽風の速度や磁気嵐の規模に対して、より重要な要素になる可能性がある。

4. ま と め

低緯度に出現したコロナホールは、そのサイズと地球近傍で観測される太陽風の速度に良い相関があることが知られていた。電波増光はコロナホールと大まかに重なり合う場所で、電波輝度が周囲より増加する現象であるが、コロナホールとの正確な関係性はいまだ不明な点が多い。本研究では、太陽風の速度は、コロナホールのサイズのみならず、その下層で観測される電波増光に対しても、そのサイズと正の相関があることがわかった。さらにコロナホール領域内部は、電波増光と重複する場所としない場所で太陽風速度との関係性に差があること。電波増光と重複する領域のほうが太陽風速度と良い相関があることを発見した。

謝 辞

本研究は、N. Gopalswamy氏、P. Mäkelä氏、そして八代誠司氏との共同研究に基づいている。

参考文献

- 1) Kundu M., McCullough T., 1972, Sol. Phys. 24, 133
- 2) 柴崎清登, 2014, 天文月報107, 304
- 3) Gopalswamy N., Shibasaki K., Thompson B. J., et al., 1999, J. Geophys. Res. 104, 9767
- 4) Gopalswamy N., Shibasaki K., Salwm M., 2000, J. As-

- trophys. Astr. 21, 413
- 5) Nolte J. T., Krieger A. S., Timothy A. F., et al., 1976, Sol. Phys. 46, 303
- 6) Wang Y.-M., Sheeley N. R. Jr., 1990, ApJ 355, 726
- 7) Luo B., Zhong Q., Liu S., et al., 2008, Sol. Phys. 24, 133
- 8) 小島正宜, 2011, 総説宇宙天気, 柴田一成・上出洋介編, 7章, 257
- 9) 鈴木 建, 犬塚修一郎, 2006, 天文月報99, 205
- 10) <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstidir/>
- 11) Zhang J., Richardson I. G., Webb D. F., et al., 2007, J. Geophys. Res. 112, A10102
- 12) Richardson I. G., Webb D. F., Zhang J., et al., 2006, J. Geophys. Res. 111, A07S09
- 13) Jian L., Russell C. T., Luhmann G., et al., 2006, Sol. Phys. 239, 337

A Study of Coronal Holes Observed by SOHO/EIT and the Nobeyama Radio Heliograph

Sachiko AKIYAMA

The Catholic University of America/NASA GSFC, Washington, D.C. 20064, USA

Abstract: Microwave enhancements (MEs) observed in a narrow range of wavelengths are located under coronal holes (CHs). A clear correlation between the CH size and the solar wind (SW) speed is well known, but we have less information about the relationship between MEs and other CH and SW properties. We study the characteristics of 21 equatorial CHs associated with CIRs during 1996 to 2005. Using SOHO/EIT 284 Å images and 17 GHz microwave images obtained by the Nobeyama Radio Heliograph, we find a linear correlation not only between the SW speed and the area of EUV CH ($r=0.62$) but also between the SW speed and the area of the ME ($r=0.79$). We also compared the EUV CH areas with and without an overlapping ME. The area of the CHs with an ME is better correlated with the SW speed ($r=0.71$) than the area of those without an ME ($r=0.36$). Therefore, the radio ME may play an important role in understanding the origin of SW.