

HAARP(High Frequency Active Auroral Research Program)サイトにおけるMUIR (Modular UHF Ionospheric Radar)で観測された電離圏人工擾乱

Artificial Ionospheric Irregularities Measured with the MUIR (Modular UHF Ionospheric Radar) at HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program)

大山伸一郎 ブレントン J. ワトキンス
OHYAMA Shin-ichiro and B. J. Watkins

要旨

高出力の HF (high-frequency) 電波を用いた電離圏加熱実験は、1970 年代以降、世界中で数多く実施され、プラズマ物理や電離圏・磁気圏物理の発展に大きく貢献してきた。その中でもここで取り上げる、米国アラスカにある HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program) 施設は中心的役割を果たしてきた。近年、HAARP 敷地内に新たに MUIR (Modular UHF Ionospheric Radar; 446 MHz) が設置され、2005 年 2 月から本格運用を開始した。このレーダーはフェーズドアレイ・システムを採用し、瞬時にビーム方向を変更できることが最大の特徴である。既に数多くの HF 電離圏加熱実験において貴重なデータを取得してきている。本論文では、それらの一部として、(1) 電離圏加熱によって発生するイオンラインとプラズマライン、(2) オーバーシュート、(3) 電離圏加熱開始から最初の 100 ms に見られるラングミュア波動の発達、を紹介する。

Many experiments involving the modification of the ionosphere with high-power, high-frequency (HF) radio waves have been performed since 1970s. HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program) presented in this paper plays important roles in this field. Recently MUIR (Modular UHF Ionospheric Radar; 446 MHz) was installed, and the radar started the operation from February 2005. The strongest advantage of this radar is the phased array system, which can quickly change the beam direction. The radar has obtained important data sets during many HF ionospheric modification experiments. In this paper we present (1) HF-induced ion line and plasma line, (2) overshoot, and (3) Langmuir waves generation in the first 100 ms after HF turn-on.

【キーワード】

電離圏人工擾乱, ラングミュア波, HAARP, MUIR
Ionospheric artificial modification, Langmuir wave, HAARP, MUIR

1 緒言

高出力の HF (high-frequency) 電波を用いた電離圏加熱実験は、長年にわたり数多く実施されてきた。世界の主な HF 電離圏加熱施設にはプエルトリコ・アレシボ(北緯 18.35°、西経 66.75°;

1981 から 1998 年まで稼動)、ノルウェー・トロムソ(北緯 69.59°、東経 19.23°)、ノルウェー・SPEAR(北緯 78.15°、東経 16.05°)、米国アラスカ・HAARP(北緯 62.39°、西経 145.15°)、米国アラスカ・HIPAS(北緯 64.87°、西経 146.84°)、ロシア・スーラ(北緯 56.13°、東経 46.10°)、ロ

シア・カルコフ(北緯 50.00°、東経 36.2°)、米国コロラド・プラトビレ(北緯 40.18°、西経 104.73°; 1970 年から 1981 年まで稼動)がある。これらのうち、アレシボ、トロムソ、SPEAR には非干渉散乱(incoherent scatter; IS)レーダーが併設されている。IS レーダーで観測できる電離圏擾乱の大きさは、レーダーの送信周波数によって異なる。各 IS レーダーの送信周波数は、アレシボ IS レーダーが 430 MHz、トロムソの UHF と VHF レーダーがそれぞれ 931 MHz と 224 MHz、SPEAR の IS レーダーが 500 MHz である。また、IS レーダーが観測する HF 加熱起源のプラズマ波の伝播特性は、磁力線と IS レーダーの視線方向がなす角に強く依存する。地表面に対する磁力線の傾きは緯度が高くなるにつれて大きくなるので、レーダーの設置場所によっても観測されるプラズマ波は異なる。アレシボ IS レーダーは低緯度にあるので、磁力線が地表面となす角は小さい。したがって、磁力線を横切って伝播していくプラズマ波を主に観測している。一方、ノルウェーの IS レーダーは高緯度にあるので、磁力線と地表面がなす角は大きく、磁力線に沿って伝播するプラズマ波を観測することができる。

電離圏加熱実験は、真空装置を用いた室内実験と比較して、以下のような長所を持つ。まず電離圏には真空装置の「壁」に相当するものがない。壁に起因した境界条件の設定が不要であり、無限に広がった理想的な実験空間を想定することが可能である。次に、密度、温度、磁場強度などが異なる様々なプラズマ条件下で実験をすることが可能である。特に高緯度では、地磁気活動度の変動によって、電離圏は様々な状態の実験空間になり得る。さらに PMSE (polar mesosphere summer echoes) やスボラディック E 層が発生している時に、電離圏加熱実験が多く実施されている。このような実験研究は、プラズマ波動理論の電離圏現象解明への応用など、学際的研究活動にも貢献している。

上記のように、電離圏加熱実験の長所を利用した様々な研究活動が実施されてきているが、電離圏人工擾乱を診断する装置の選択は常に重要な課題である。その中でも、IS レーダーは代表的な診断装置である [Shoven and Kim, 1978; Hagfors et al., 1983; Stubbe et al., 1985; Duncan and Sheerin,

1985; Djuth et al., 1986; Cheung et al., 1989; Djuth et al., 1990; Cheung et al., 1992; Isham and Hagfors, 1993; Djuth et al., 1994; Isham et al., 1999; Rietveld et al., 2000]。IS レーダーが観測するプラズマ波はラングミュア波である。HF 送信電波は PDI (parametric decay instability) や OTSI (oscillating two-stream instability) を介して様々なスペクトル特性を持つプラズマ波動を励起する [e.g., Fejer and Kuo, 1973; Perkins et al., 1974]。これらの波動を IS レーダーで観測することにより、ラングミュア波の発生機構や伝播過程などを、高い高度・時間分解能のデータを用いて研究することが可能である。

ここで、IS レーダーで観測されるプラズマ波動の特性を、図 1 を用いながら簡単に紹介する。高出力 HF アンテナから送信された電波 (EM₀) は OTSI や PDI 過程を経てラングミュア波 (LW) やイオン音波 (IA) を励起する。発生したラングミュア波は、その周波数とは異なる周波数を持つ別のラングミュア波を励起しながら電離圏中を伝播していく。これらのプラズマ波は、イオンラインとプラズマラインといったレーダーが観測するスペクトルに様々な特徴をもって現れる。イオンラインはレーダー送信周波数 (f_{radar}) 付近にピークを持つ。その周波数からイオン音波周波数 (数 kHz) だけ高・低周波数側にずれたところに、イオン音波ラインと呼ばれるピークが現れる。これらに合わせて、OTSI 過程によって発生したプラズマ波に起因したスペクトルピークが、 f_{radar} に発生することもある。

プラズマラインには、 f_{radar} に対して高周波数側に発生するアップシフト・プラズマラインと、低周波数側に発生するダウンシフト・プラズマラインがある。それぞれ、レーダー視線方向に対して、レーダーに向かっていく方向と離れていく方向に伝播するラングミュア波を観測している。電離圏加熱中のプラズマラインは、HF 電波送信周波数 (f_{HF}) だけ f_{radar} からずれた周波数 ($f_{\text{radar}} \pm f_{\text{HF}}$) の近傍に発生する。これは励起されたラングミュア波が f_{HF} に近い周波数を持つからである。電離圏加熱中には、様々な周波数特性を持ったラングミュア波が励起されることが知られているが、図 1 にはその一例としてカスケードラインと呼ばれるスペクトルが観測された場合を示す。

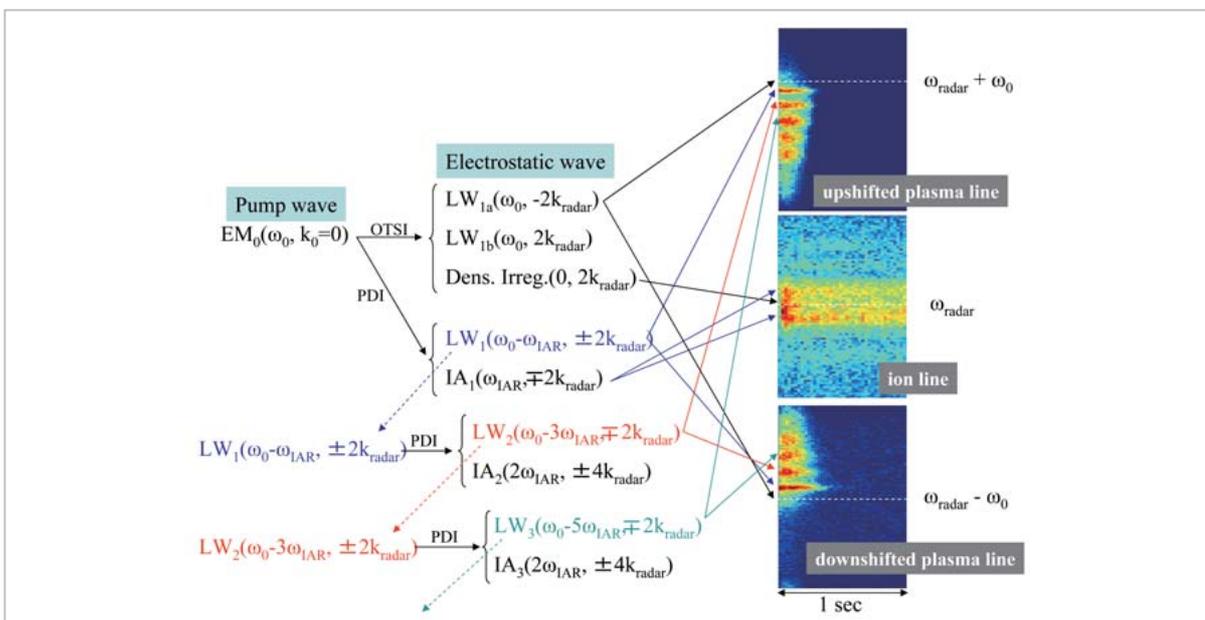


図1 HF電離圏加熱によって励起されたアップシフト(右上パネル)、ダウンシフト(右下パネル)プラズマラインとイオンライン(右中央パネル)の例

PDIやOTSIに伴うプラズマ波動の励起過程を左に示す。

最近、HAARP (HF Active Auroral Research Program) 施設内に新たに MUIR (Modular UHF Ionospheric Radar ; $f_{radar} = 446$ MHz) が設置された。本レーダーはアメリカ科学財団 (National Science Foundation) と SRI International が北米極域への設置を進めている AMISR (Advanced Modular Incoherent Scatter Radar) の開発版である (詳細については次章を参照)。本レーダーの最大の特徴は、フェーズドアレイ・システムを採用している点にある。このシステムにより、電波送信ごとにレーダービーム方向を変更することができる。したがって、ラングミュア波の空間分布を高速にモニターすることができる。この特徴は、磁力線に対して強い伝播特性を持つプラズマ波の診断にとって、非常に強力である。MUIR を用いた最初の電離圏加熱実験観測は、2005年2月3日に実施された [Oyama et al., 2006]。その後も多くの観測実験が実施され、科学的意義の高いデータが取得されている。本論文ではそれらのデータを基に、MUIR の最新の観測・解析結果を紹介する。

2 観測装置

2.1 HAARP 電離圏加熱施設

HAARP は米国アラスカ州南部のガコナ (アン

カレッジカフェアバンクスから車で約5時間) に設置された、電離圏観測施設である。運営は ONR (Office of Naval Research) と Air Force Research Laboratory が行っている。図2にガコナの位置を示す。電波観測装置 (イメージングリオメーター、デジゾンデ、VLF レシーバー、VHF レーダー、HF レーダーなど) や光学観測装

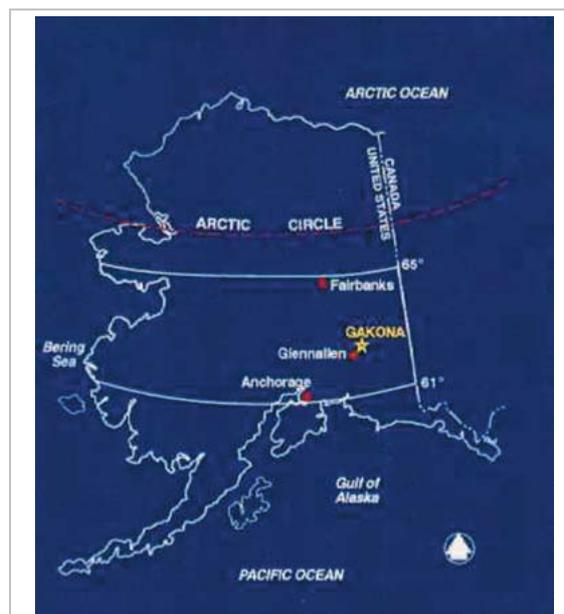


図2 アラスカの地図

HAARPがあるガコナを黄色で示す。

表1 HAARP の高出力 HF 送信電波の特性

Radiated Power	3600 kW
Frequency Coverage	2.8-10 MHz
Antenna Gain	20-31 dB
ERP	86-95 dBW
Antenna Beam Width	4.5°-15°
Beam Pointing Angle	30° from zenith @ all azimuth
Re-position Time	15 μs
Polarization	O/X, Linear
Modulation Types	AM/FM/Pulse/CW
Modulation Frequency	0-30 kHz Generally



図3 HAARP の航空写真(HAARP 提供)

置(全天イメージャー、フォトメーターなど)を中心に多種類の装置が設置されている。さらにフェアバンクス近郊のポーカーフラット実験場にある装置など HAARP 施設外の装置を用いた観測実験も活発に実施されている。その中でも最大の特徴は HF 電波の高出力トランスミッターとアンテナである。2007 年夏にアンテナの拡張工事が終了し、最大出力(3600 kW)、使用可能 HF 周波数帯域(断続的に 2.8~10 MHz)共に世界最大の電離圏加熱施設となった。表 1 にアンテナのパラメータをまとめる。図 3 は HAARP 施設の航空写真である。手前に見えるアンテナ群が高出力 HF 送信用であり、奥の白い建物内に制御室がある。

2.2 MUIR

MUIR(送信周波数 446 MHz)は、米国アラスカのポーカーフラット実験場とカナダのレゾリュートベイに建設が進められている AMISR(Advanced Modular Incoherent Scatter Radar)と基本的には同じシステムで稼動するレーダーである。パネルと呼ばれる 32 個の素子アンテナ

(antenna element units; AEUs)で構成されたユニットが最小単位となり、そのパネルを自由に配置することができる。RF 入力・出力、AC 電力の入力、光ケーブル接続による送受信及びビーム方向制御のための通信を、制御コンピュータとそれぞれのパネルが行っている。MUIR は、現在 16 パネルで構成されている。最大出力は 512 kW、開口面積は 219.8 m²、システム温度は 120 K である。ビーム幅(パネル配置に依存)は南北方向に 4°、東西方向に 2.5°である。フェーズドアレイ・システムによって、どの方位角に対しても天頂から最大 25°の傾きまで、送信パルスごとにビーム方向を変更することができる。一般的に利用されているバイナリーコーディングを用いたパルス変調によって、高いレンジ分解能とスペクトルの周波数分解能を得ることができる。最短のパルス長とサンプリング間隔は 1 μs で、これは約 150 m のレンジ分解能に相当する。

図 4 は MUIR の概観である。鉄骨製の基礎の上に、4×4 の配置で計 16 枚のパネルが地面に水平に設置されている。基礎の脚駄に見える木柱は、近隣に生息するヘラジカ(ムース)がレーダー下部に侵入し、ケーブル等に危害を及ぼすのを防ぐためである。

3 観測結果

本章では、電離圏加熱中に MUIR が観測した様々な現象を紹介する。稼動から既に 2 年が経過し、数多くの学術的成果を収めてきているため、すべてを網羅することはできないので、ここでは以下の 3 項目に限定して紹介する。



図4 MUIR の概観

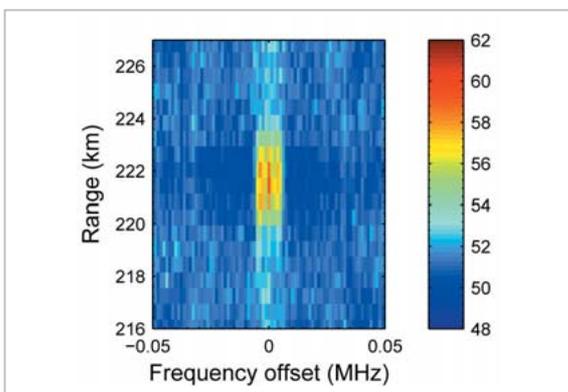


図5a HF 電離圏加熱によって励起されたイオンライン

横軸が 446 MHz からの周波数オフセットで、縦軸がレンジ。スペクトル強度 (デシベル値) をカラーで示す。

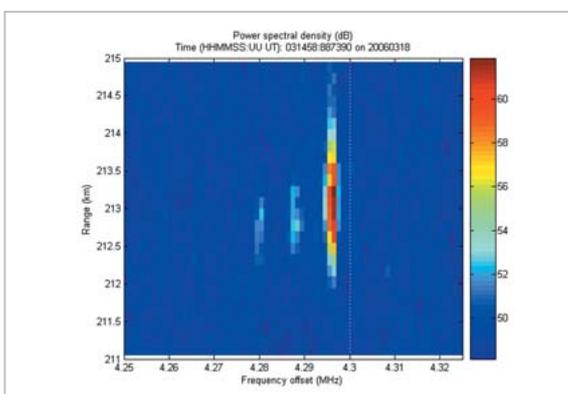


図5b アップシフト・プラズマライン

図形式は図 5 a と同じ。

3.1 電離圏加熱によって発生したイオンラインとプラズマライン

図 5 (a) に電離圏加熱中に観測されるイオンラインの一例を示す。レンジ幅約 3 km (高度幅約 2.9 km) 内で、スペクトル強度が大きく上昇している。二本のイオン音波ピークとともに、 $\Delta f = 0$ MHz のところにも OTSI ピークが現れていることが分かる。これらのスペクトルピークの強度は、電離圏の状態や HF 送信周波数によっても変化し、時にはイオン音波ピークに非対称性が見られることもある。

図 5 (b) はアップシフト・プラズマラインの一例である。このときの f_{HF} は 4.3 MHz であったので、 f_{radar} から 4.3 MHz ずれた周波数領域の近辺にプラズマラインが発生している。約 $\Delta 4.296$ MHz に現れたピークが decay ラインで、 $\Delta 4.3$ MHz からのずれ (約 4 kHz) がイオン音波周波数に相当す

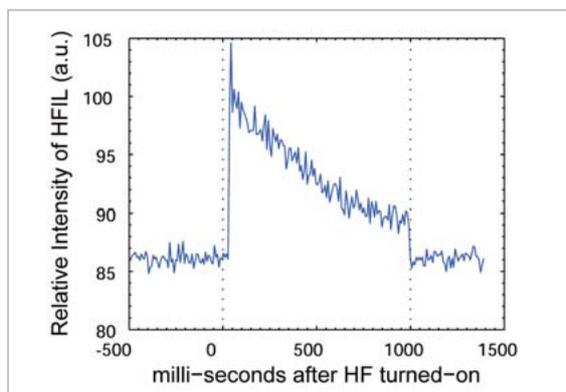


図6 HF 電離圏加熱によって励起されたイオンラインの強度の時間変化

HF 加熱時間は 1 秒。

る。イオン音波周波数の 2 倍ずつ decay ラインからシフトした周波数にカスケードラインが現れる。この図の場合、2 本のカスケードラインが見られるが、その数は電離圏の状態や HF 送信電波の出力などによって変化する。

3.2 オーバーシュート

図 6 は 10 ms ごとに観測されたイオンライン強度の時系列変化を示す。時刻 0 ms が HF 送信電波がオンになった瞬間を示す。この場合、HF 送信電波は 1 秒間オンであった。HF 送信電波がオンになってから数 10 ms 後、イオンライン強度は急激に上昇している。この現象をオーバーシュートと呼ぶ。アレシボ IS レーダーのような受信感度が高いレーダーの場合、オーバーシュートが数 ms 以内に発生することが報告されているが、MUIR は開口面積が小さいためにオーバーシュートが観測されるまでにより時間を要したと考えられる。オーバーシュート発生後、強度はすぐに減少し、その後はなだらかに減衰する。このような時間変動について、プラズマ擾乱の発生・消滅と関連して様々な解析が行われている [Petviashvili, 1976; Weatherall et al., 1982; Sheerin et al., 1982; Nicholson et al., 1984; Payne et al., 1984]。

3.3 電離圏加熱開始から最初の 100 ms に見られるラングミュア波動の発達

図 7 は HF 送信電波をオンにしてから 33、43、103、113 ms 後に 3 方向 (鉛直、磁力線方向、その間) で観測されたアップシフト・プラズマラインを示す。HF 送信電波は 100 ms オンであった。

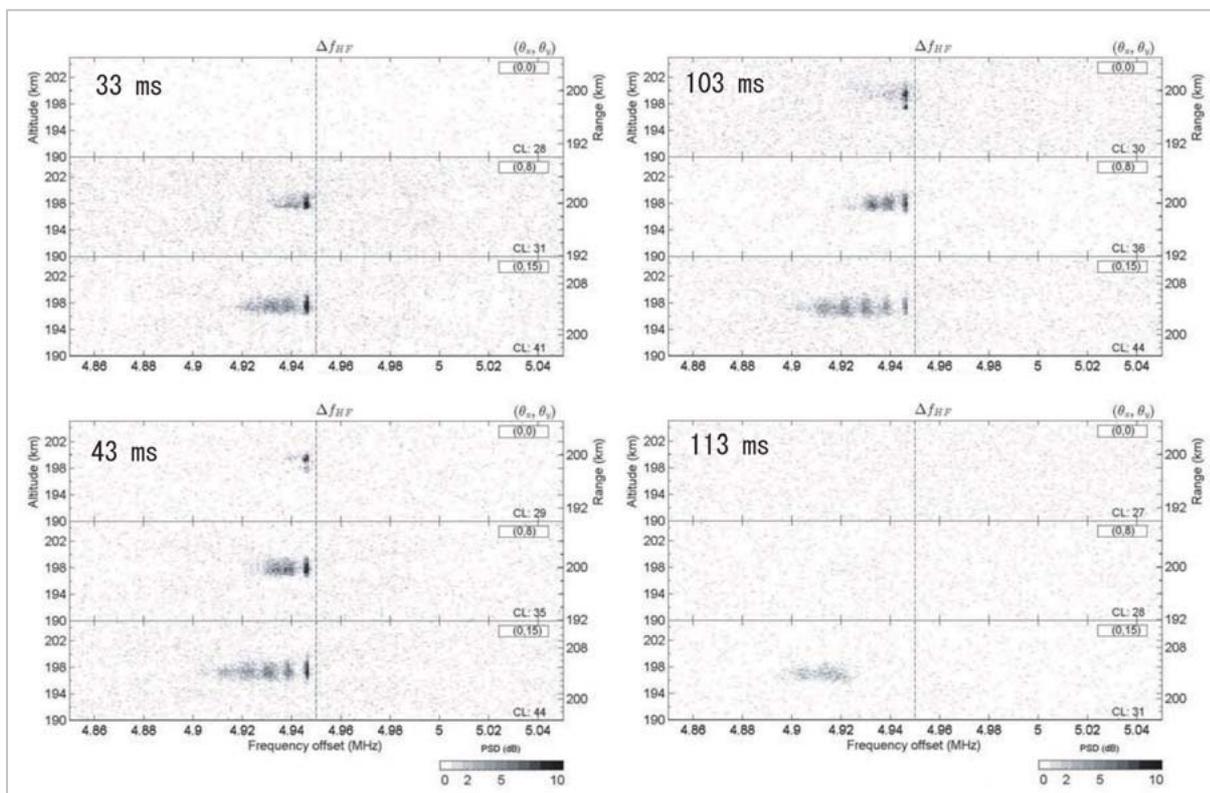


図7 HF加熱開始から33, 43, 103, 133 ms後のアップシフト・プラズマライン

各パネルには鉛直(上段)、沿磁力線方向(下段)、その中間方向(中段)で観測されたスペクトルを示す。このときHF周波数は4.95 MHzで、HF加熱時間は100 ms。

したがって最後二つのスペクトル(103及び113 ms後)はHF送信電波がオフになってからのものである。黒く見える部分が強度の高い部分を表す。磁力線に対するレーダーの視線方向によって、スペクトルに明らかな違いが見られる。これは、レーダーで捕捉できるプラズマ波は、レーダーの送信電波の波数ベクトルと一致した波数ベクトルを持つラングミュア波のみであり、ラングミュア波の伝播方向が磁力線方向に局在化していることに起因している。したがって、磁力線方向のスペクトルが最大強度を持ち、カスケードラインが最も発達している。

103 ms後のスペクトルはHF送信電波がオフになった直後(3 ms後)のものである。電磁波の供給がなくなった後もプラズマラインの特徴は43 ms後のものとほぼ同じであることから、発生したラングミュア波の減衰には3 ms以上必要であることが推定される。113 ms後の磁力線方向以外のスペクトルは消失してしまっている。しかし、磁力線方向のスペクトルは、周波数分布を大きく変化させているものの、まだ確認できるレベ

ルにある。このことから、減衰時間もラングミュア波の伝播方向と磁力線方向に関係することが分かる。

このようにラングミュア波の発達過程を複数の方向で同時に観測したのは世界初である。

4 まとめ

本論文では、HAARP施設内に設置されたMUIRが電離圏加熱実験中に観測した結果の一部を紹介した。現在、HAARPはHF電波出力及び使用可能な周波数帯域において、世界最大である。様々な電波・光学観測機器が施設内に設置され、総合的な観測実験が実施されてきている。それらのどの装置とも異なった、他の装置では取得することができない観測情報をMUIRは得ることができる。しかし現在の電離圏加熱実験は、光学観測装置や電波観測装置を組み合わせた総合的観測が必要になる傾向にある。HAARP施設内の装置はもちろん、ポーカーフラットなどの周辺の観測装置も視野に入れた実験が計画されている。

MUIR もそのような総合的観測実験に参加し、多くの学術的成果を発表することが期待されている。

謝辞

HAARP は米国空軍と海軍が共同で運営する国

防プロジェクトです。この研究は Office of Naval Research (ONR) の予算 (N00014-03-1-0165) から援助を受けています。著者は、実験実施に関して HAARP スタッフに感謝いたします。Lewis Duncan 教授と William Gordon 教授の協力にも感謝いたします。MUIR 建設は米国科学財団、HAARP 及び SRII の協力によって実現しました。

参考文献

- 1 Cheung, P. Y., A. Y. Wong, T. Tanikawa, J. Santoru, D. F. DuBois, H. A. Rose, and D. Russell, "Short-time-scale evidence for strong Langmuir turbulence during HF heating of the ionosphere", *Phys. Rev. Lett.*, 62, 2676-2679, 1989.
- 2 Cheung, P. Y., D. F. DuBois, T. Fukuchi, K. Kawan, H. A. Rose, D. Russel, T. Tanikawa, and A. Y. Wong, "Investigation of strong Langmuir turbulence in ionospheric modification", *J. Geophys. Res.*, 97(A7), 10,575-10,600, 1992.
- 3 Djuth, F. T., C. A. Gonzales, and H. M. Ierlic, "Temporal evolution of the HF-enhanced plasma line in the Arecibo F region", *J. Geophys. Res.*, 91(A11), 12,089-12,107, 1986.
- 4 Djuth, F. T., M. P. Sulzer, and J. H. Elder, "High resolution observations of HF-induced plasma waves in the ionosphere", *Geophys. Res. Lett.*, 17(11), 1893-1896, 1990.
- 5 Djuth, F. T., P. Stubbe, M. P. Sulzer, H. Kohl, M. T. Rietveld, and J. H. Elder, "Altitude characteristics of plasma turbulence excited with the Tromsø superheater", *J. Geophys. Res.*, 99(A1), 333-339, 1994.
- 6 Duncan, L. M., and J. P. Sheerin, "High-resolution studies of the HF ionospheric modification interaction region", *J. Geophys. Res.*, 90(A9), 8371-8376, 1985.
- 7 Fejer, J. A., and Y. Y. Kuo, "Structure in the nonlinear saturation spectrum of parametric instabilities", *Phys. Fluids*, 16(9), 1490-1496, 1973.
- 8 Hagfors, T., W. Kofman, H. Kopka, P. Stubbe, and T. Äijänen, "Observations of enhanced plasma lines by EISCAT during heating experiments", *Radio Sci.*, 18(6), 861-866, 1983.
- 9 Isham, B., and T. Hagfors, "Observations of the temporal and spatial development of induced and natural plasma lines during HF modification experiments at Arecibo using chirped incoherent scatter radar", *J. Geophys. Res.*, 98(A8), 13,605-13,625, 1993.
- 10 Isham, B., C. La Hoz, M. T. Rietveld, T. Hagfors, and T. B. Leyser, "Cavitating Langmuir turbulence observed during high-latitude ionospheric wave interaction experiments", *Phys. Rev. Lett.*, 83, 2576-2579, 1999.
- 11 S. Oyama, B. J. Watkins, F. T. Djuth, M. J. Kosch, P. A. Bernhardt, and C. J. Heinselman, "Persistent enhancement of the HF pump-induced plasma line measured with a UHF diagnostic radar at HAARP", *J. Geophys. Res.*, 111, A06309, doi:10.1029/2005JA011363, 2006.
- 12 Perkins, F. W., C. Oberman, and E. J. Valeo, "Parametric instabilities and ionospheric modification", *J. Geophys. Res.*, 79(10), 1478-1496, 1974.
- 13 Rietveld, M. T., B. Isham, H. Kohl, C. La Hoz, and T. Hagfors, "Measurements of HF-enhanced plasma and ion lines at EISCAT with high-altitude resolution", *J. Geophys. Res.*, 105(A4), 7429-7439, 2000.

- 14 Showen, R. L., and D. M. Kim, "Time variations of HF-induced plasma waves", J. Geophys. Res., 83(A2), 623-628,1978.
- 15 Stubbe, P., H. Kopka, M. T. Rietveld, A. Frey, and P. Hoeg, "Ionospheric modification experiments with the Tromsø heating facility", J. Atmos. Terr. Phys., 47, 1151-1163,1985.
- 16 Petviashvili, V. I. (1976), "Formation of three-dimensional Langmuir solitons by an intense radio wave in the ionosphere (in Russian)", Fiz. Plazmy, 2, 450, 1976. (Sov. J. Plasma Phys., Engl. Transl., 2, 247.)
- 17 Weatherall, J. C., J. P. Sheerin, D. R. Nicholson, G. L. Payne, M. V. Goldman, and P. J. Hansen, "Solitons and Ionospheric heating", J. Geophys. Res., 87(A2), 823-832,1982.
- 18 Sheerin, J. P., D. R. Nicholson, G. L. Payne, P. J. Hansen, J. C. Weatherall, and M. V. Goldman, "Solitons and ionospheric modification", J. Atmos. Terr. Phys., 44, 1043-1048,1982.
- 19 Nicholson, D. R., G. L. Payne, R. M. Downie, and J. P. Sheerin, "Solitons versus parametric instabilities during ionospheric heating", Phys. Rev. Lett., 52, 2152-2155,1984.
- 20 Payne, G. L., D. R. Nicholson, R. M. Downie, and J. P. Sheerin, "Modulational instability and soliton formation during ionospheric heating", J. Geophys. Res., 89(A12), 10,921-10,928,1984.

おおやま しん いちろう
大山伸一郎

名古屋大学太陽地球環境研究所助教
博士(理学)
超高層物理学

Brenton J. Watkins

アラスカ大学フェアバンクス校地球物
理学研究所教授 Ph.D.
超高層物理学