
ロケット・レーダー同時観測による
電離圏 E 領域イレギュラリティの生成機構の研究

(研究課題番号 14340145)

平成 14 年度～平成 15 年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成 16 年 3 月

研究代表者 深尾 昌一郎

(京都大学宙空電波科学研究センター)

ロケット・レーダー同時観測による
電離圏 E 領域イレギュラリティの生成機構の研究

(研究課題番号 14340145)

平成 14 年度～平成 15 年度科学研究費補助金

(基盤研究(B)(2))

研究成果報告書

平成 16 年 3 月

研究代表者 深尾 昌一郎

(京都大学宙空電波科学研究センター)

I 研究組織

研究代表者

深尾 昌一郎 (京都大学宙空電波科学研究センター・教授)

研究分担者

山本 衛 (京都大学宙空電波科学研究センター・助教授)

橋口 浩之 (京都大学宙空電波科学研究センター・助教授)

山本 真之 (京都大学宙空電波科学研究センター・助手)

[平成 15 年度のみ]

中村 卓司 (京都大学宙空電波科学研究センター・助教授)

斉藤 享 (独立行政法人通信総合研究所・電磁波計測部門
・電離圏・超高層グループ・専攻研究員)

(平成 14 年度：京都大学宙空電波科学研究センター

・COE 研究員)

斎藤 昭則 (京都大学大学院理学研究科・助手)

塩川 和夫 (名古屋大学太陽地球環境研究所・助教授)

大塚 雄一 (名古屋大学太陽地球環境研究所・助手)

高橋 幸弘 (東北大学大学院理学研究科・講師)

丸山 隆 (独立行政法人通信総合研究所・電磁波計測部門
・電離圏・超高層グループ長(研究職))

野崎 憲朗 (独立行政法人通信総合研究所・電磁波計測部門
・電離圏・超高層グループ主任研究員)

II 研究経費

交付決定額

(金額単位：千円)

年度	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	11,000	0	11,000
平成 15 年度	3,400	0	3,400
合計	14,400	0	14,400

III 研究発表

(1) 学会誌等

- Gavrilov, N. M., K. Shiokawa, and T. Ogawa, Seasonal variations of medium-scale gravity wave parameters in the lower thermosphere obtained from spectral airglow temperature imager observations at Shigaraki, Japan, *J. Geophys. Res.*, **107** (D24), Art. No. 4755, 2002.
- Horinouchi, T., T. Nakamura, and J. Kosaka, Convectively generated mesoscale gravity waves simulated throughout the middle atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (21), Art. No. 2007, 2002.
- Hysell, D. L., M. Yamamoto, and S. Fukao, Simulations of plasma clouds in the midlatitude E region ionosphere with implications for type I and type II quasiperiodic echoes, *J. Geophys. Res.*, **107** (A10), Art. No. 1313, 2002.
- Hysell, D. L., M. Yamamoto, and S. Fukao, Imaging radar observations and theory of type I and type II quasi-periodic echoes, *J. Geophys. Res.*, **107** (A11), Art. No. 1360, 2002.
- Maruyama, T., Retrieval of in situ electron density in the topside ionosphere from cosmic radio noise intensity by an artificial neural network, *Radio Sci.*, **37** (5), Art. No. 1077, 2002.
- Maruyama T., K. Nozaki, M. Yamamoto, and S. Fukao, Ionospheric height changes at two closely separated equatorial stations and implications in spread F onsets, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, **64**, 1557-1563, 2002.
- Nakamura, T., S. Morita, T. Tsuda, H. Fukunishi, and Y. Yamada, Horizontal structure of wind velocity field around the mesopause region derived from meteor radar observations, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **64** (8-11), 947-958, 2002.
- Ogawa, T., N. Balan, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C. Ihara, T. Shimomai, and A. Saito, Observations and modeling of 630 nm airglow and total electron content associated with traveling ionospheric disturbances over Shigaraki, Japan, *Earth Planets Space*, **54** (1), 45-56, 2002.
- Ogawa, T., O. Takahashi, Y. Otsuka, K. Nozaki, M. Yamamoto, and K. Kita, Simultaneous middle and upper atmosphere radar and ionospheric sounder observations of midlatitude E region irregularities and sporadic E layer, *J. Geophys. Res.*, **107** (A10), Art. No. 1275, 2002.
- Ogawa, T., N. Balan, Y. Otsuka, K. Shiokawa, C. Ihara, T. Shimomai, and A. Saito, Observations and modeling of 630 nm airglow and total electron content associated with traveling ionospheric disturbances over Shigaraki, Japan, *Earth Planets Space*, **54** (1), 45-56, 2002.
- Otsuka, Y., T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, *Earth Planets Space*, **54** (1), 63-70, 2002.
- Otsuka, Y., K. Shiokawa, T. Ogawa, and P. Wilkinson, Geomagnetic conjugate observations of equatorial airglow depletions, *Geophys. Res. Lett.*, **29** (15), Art. No. 1753, 2002.
- Saito, A., M. Nishimura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Tsugawa, Y. Otsuka, S. Miyazaki, and M. C. Kelley,

Observations of traveling ionospheric disturbances and 3-m scale irregularities in the nighttime F-region ionosphere with the MU radar and a GPS network, *Earth Planets Space*, **54** (1), 31-44 2002.

Shiokawa, K., Y. Otsuka, M. K. Ejiri, Y. Sahai, T. Kadota, C. Ihara, T. Ogawa, K. Igarashi, S. Miyazaki, and A. Saito, Imaging observations of the equatorward limit of midlatitude traveling ionospheric disturbances, *Earth Planets Space*, **54** (1), 57-62, 2002.

Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa, N. Balan, K. Igarashi, A. J. Ridley, D. J. Knipp, A. Saito, and K. Yumoto, A large-scale traveling ionospheric disturbance during the magnetic storm of 15 September 1999, *J. Geophys. Res.*, **107** (A6), Art. No. 1088, 2002.

Ejiri, M. K., K. Shiokawa, T. Ogawa, K. Igarashi, T. Nakamura, and T. Tsuda, Statistical study of short-period gravity waves in OH and OI nightglow images at two separated sites, *J. Geophys. Res.*, **108** (D21), Art. No. 4679, 2003.

Fukao, S., Y. Ozawa, M. Yamamoto, and R. T. Tsunoda, Altitude-extended equatorial spread F observed near sunrise terminator over Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (22), Art. No. 2137, 2003.

Fukao, S., H. Hashiguchi, M. Yamamoto, T. Tsuda, T. Nakamura, M. K. Yamamoto, T. Sato, M. Hagio, and Y. Yabugaki, Equatorial atmosphere radar (EAR): System description and first results, *Radio Sci.*, **38** (3), Art. No. 1053, 2003.

Maruyama, T., H. Kato, and M. Nakamura, Ionospheric effects of the Leonid meteor shower in November 2001 as observed by rapid run ionosondes, *J. Geophys. Res.*, **108** (A8), Art. No. 1324, 2003.

Nakamura, T., T. Aono, T. Tsuda, A. G. Admiranto, E. Achmad, and Suranto, Mesospheric gravity waves over a tropical convective region observed by OH airglow imaging in Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (17), Art. No. 1882, 2003.

Otsuka, Y., T. Kadota, K. Shiokawa, T. Ogawa, S. Kawamura, S. Fukao, and S. R. Zhang, Optical and radio measurements of a 630-nm airglow enhancement over Japan on 9 September 1999, *J. Geophys. Res.*, **108** (A6), Art. No. 1252, 2003.

Sagawa, E., T. Maruyama, T. J. Immel, H. U. Frey, S. and B. Mende, Global view of the nighttime low-latitude ionosphere by the IMAGE/FUV 135.6 nm observations, *Geophys. Res. Lett.*, **30** (10), Art. No. 1534, 2003.

Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa, S. Kawamura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Nakamura, T. Tsuda, N. Balan, K. Igarashi, G. Lu, A. Saito, and K. Yumoto, Thermospheric wind during a storm-time large-scale traveling ionospheric disturbance, *J. Geophys. Res.*, **108** (A12), Art. No. 1423, 2003.

Shiokawa, K., T. Kadota, Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Nakamura, and S. Fukao, A two-channel Fabry-Perot interferometer with thermoelectric-cooled CCD detectors for neutral wind measurement in the upper atmosphere, *Earth Planets Space*, **55** (5), 271-275, 2003.

Shiokawa, K., C. Ihara, Y. Otsuka, and T. Ogawa, Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images, *J. Geophys. Res.*, **108** (A1), Art. No. 1052, 2003.

Shiokawa, K., Y. Otsuka, C. Ihara, T. Ogawa, and F. J. Rich, Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance at midlatitude, *J. Geophys. Res.*, **108** (A4), Art. No. 1145, 2003.

Shiokawa, K., M. K. Ejiri, T. Ogawa, Y. Yamada, H. Fukunishi, K. Igarashi, and T. Nakamura, A localized structure in OH airglow images near the mesopause region, *J. Geophys. Res.*, **108** (D2), Art. No. 4048, 2003.

Tsugawa, T., A. Saito, Y. Otsuka, M. Yamamoto, Damping of large-scale traveling ionospheric disturbances detected with GPS networks during the geomagnetic storm, *J. Geophys. Res.*, **108** (A3), Art. No. 1127, 2003.

Yokoyama, T., M. Yamamoto, and S. Fukao, Computer simulation of polarization electric fields as a source of midlatitude field-aligned irregularities, *J. Geophys. Res.*, **108** (A2), Art. No. 1054, 2003.

Balan, N., S. Kawamura, T. Nakamura, M. Yamamoto, S. Fukao, K. Igarashi, T. Maruyama, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa, H. Alleyne, S. Watanabe, and Y. Murayama, Simultaneous mesosphere/lower thermosphere and thermospheric F region observations during geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, **109** (A4), Art. No. A04308, 2004.

Fukao, S., Y. Ozawa, T. Yokoyama, M. Yamamoto, and R. T. Tsunoda, First observations of the spatial structure of F region 3-m-scale field-aligned irregularities with the Equatorial Atmosphere Radar in Indonesia, *J. Geophys. Res.*, **109** (A2), Art. No. A02304, 2004.

Yokoyama, T., M. Yamamoto, S. Fukao, and R. B. Cosgrove, Three-dimensional simulation on generation of polarization electric field in the midlatitude E-region ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **109** (A1), Art. No. A01309, 2004.

(2) 口頭発表

国際シンポジウム

Fukao, S., New aspects of the ionospheric irregularities observed with the Equatorial Atmosphere Radar, EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, April 6-11, 2003.

Shiokawa, S., T. Kadota, Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Nakamura, T. Tsuda, and S. Fukao, A two-channel Fabry-Perot interferometer with cooled-CCD detectors for neutral wind measurement in the upper atmosphere, EGS-AGU-EGU Joint Assembly, Nice, France, April 6-11, 2003.

Fukao, S., Frontiers of radar remote sensing of the Earth's atmosphere and Peruvian contributions, Invited Lecture, The National Science and Technological Counsel of Peru, May 21, 2003.

Yamamoto, M., and S. Fukao, Rocket/radar experiment of the E-region ionosphere: SEEK-2 (Sporadic-E Experiment over Kyushu-2), 10th MST Radar Workshop, Piura, May 13-20, 2003.

Saito, S., S. Fukao, R. Tsunoda, and M. Yamamoto, Radar observations of field-aligned plasma irregularities in the sporadic E experiment over Kyushu 2 (SEEK-2), 10th MST Radar Workshop, Piura, May 13-20, 2003.

- Yokoyama, T., M. Yamamoto, and S. Fukao, Rocket observation of electric field conducted in the SEEK-2, 10th MST Radar Workshop, Piura, May 13-20, 2003.
- Fukao, S., Coherent radar observations of equatorial spread F irregularities in the West Pacific, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Shiokawa, K., Y. Otsuka, T. Ogawa, S. Kawamura, M. Yamamoto, S. Fukao, T. Nakamura, T. Tsuda, N. Balan, K. Igarashi, and G. Lu, Thermospheric wind during a storm-time large-scale traveling ionospheric disturbance, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Kagan, L. M., S. Fukao, M. Yamamoto, and P. B. Rao, Observations of neutral winds and electric fields using backscatter from field-aligned irregularities, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Fukao, S., and M. Yamamoto, A quasi-periodic structure associated with Sporadic-E layers and neutral turbulence: Results from the SEEK rocket/radar campaigns (invited), XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Nanan, B., S. Kawamura, T. Nakamura, M. Yamamoto, S. Fukao, K. Igarashi, K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa, H. Alleyne, and S. Watanabe, Simultaneous mesosphere, thermosphere and ionosphere studies during geomagnetic storms, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Saito, A., S. Fukao, M. Yamamoto, K. Shiokawa, Y. Otsuka, M. Kubota, and T. Ogawa, Radio and optical measurement of the ionosphere with observational networks in Japan, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Yamamoto, M., and S. Fukao, Mid-latitude E-region irregularities revealed by the SEEK-2 (Sporadic-E Experiment over Kyushu 2) experiment, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Larsen, M. F., M. Yamamoto, R. Tsunoda, and S. Fukao, SEEK-2: Observations of neutral winds and turbulence in a region sporadic E and QP structure, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Bernhardt, P. A., C. A. Selcher, C. S. Siefring, M. Yamamoto, and S. Fukao, SEEK2 radio beacon imaging of sporadic-E layers, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Saito, S., M. Marumoto, M. Yamamoto, S. Fukao, and R. T. Tsunoda, Radar observations of field-aligned plasma irregularities in the Sporadic E Experiment over Kyushu 2 (SEEK-2), XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Yokoyama, T., M. Yamamoto, S. Fukao, and R. F. Pfaff, Study of generation of polarization electric fields associated with a sporadic-E layer, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.
- Ogawa, T., Y. Otsuka, K. Shiokawa, and F. Onoma, Some aspects of summertime low-altitude quasi-periodic echoes observed with the MU radar, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.

Onoma, F., T. Ogawa, Y. Otsuka, K. Shiokawa, and M. Yamamoto, Simultaneous radar and optical observation of E-region irregularities and F-region traveling ionospheric disturbances, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.

Arakawa, M., H. Fukunishi, Y. Takahashi, M. Sato, T. Ono, M. Yamamoto, K. Shiokawa, A. Saito, Masa-yuki Yamamoto, and M. F. Larsen, The structure of the TMA-induced optical emission observed in the SEEK-2 campaign, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.

Maruyama, T., H. Kato, M. Nakamura, M. Yamamoto, and S. Fukao, Rapid-run ionosonde observations of sporadic-E during the SEEK-2 campaign, XXIII IUGG General Assembly, Sapporo, June 30-July 11, 2003.

国内学会講演会等

山本 衛, 深尾 昌一郎, 早川 基, R. T. Tsunoda, M. F. Larsen, P. A. Bernhardt, R. F. Pfaff, ロケット・レーダー等によるスプラディック E 層統合観測 SEEK-2 速報, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

Saito, S., M. Yamamoto, S. Fukao, and R. T. Tsunoda, Radar Observations of field-aligned plasma irregularities in the Sporadic E Experiment over Kyushu 2 (SEEK-2), 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

横山 竜宏, 山本 衛, R. F. Pfaff, 深尾 昌一郎, 岩上 直幹, SEEK-2 キャンペーン: 電離圏 E 領域の電界観測結果と QP エコーの関連, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

小澤 雄一郎, 山本 衛, 橋口 浩之, 深尾 昌一郎, 大塚 雄一, 赤道大気レーダー観測に基づく沿磁力線イレギュラリティと背景電離圏の関連の研究, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

斎藤 昭則, 大塚 雄一, N. Aponte, M. C. Kelley, 中規模伝搬性電離圏擾乱: Perkins 不安定性は起きているのか?, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

津川 卓也, 斎藤 昭則, 大塚 雄一, GEONET 全電子数観測による大規模伝搬性電離圏擾乱の統計的研究(2), 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

小川 忠彦, 大塚 雄一, 塩川 和夫, 山本 衛, MU レーダーで観測された低高度準周期エコーの新様相, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

大塚 雄一, 塩川 和夫, 小川 忠彦, 全天大気光イメージャーと GPS による赤道プラズマバブルの観測, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.

- 小野間 史樹, 大塚 雄一, 塩川 和夫, 小川 忠彦, 山本 衛, E 領域 FAI と F 領域 TID の空間構造・移動の関係, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.
- 荒牧 徹, 大塚 雄一, 小川 忠彦, 塩川 和夫, GPS 3 点観測による F 領域イレギュラリティのドリフト速度の測定, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.
- 小竹 論季, 大塚 雄一, 小川 忠彦, 斎藤 昭則, 津川 卓也, 川村 誠治, 深尾 昌一郎, 国土地理院 GPS 観測網と MU レーダーを利用した伝搬性電離圏擾乱の研究, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.
- 荒川 真木子, 佐藤 光輝, 高橋 幸弘, 福西 浩, 小野 高幸, 山本 衛, 深尾昌一郎, 斎藤 昭則, 塩川 和夫, M. F. Larsen, L. J. Gelinas, SEEK-2 ロケット実験において観測された人口オーロラ発光, 第 112 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 電気通信大学, 2002 年 11 月 11~14 日.
- 山本 衛, 横山 竜宏, 深尾 昌一郎, 早川 基, ロケット S-310-31/32 号機の連続打上げ観測に基づくスプラディック E 層空間構造の研究 — SEEK-2 速報 —, 第 3 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 1 月 9~10 日.
- 福西 浩, 荒川 真木子, 小野 高幸, 塩川 和夫, 深尾 昌一郎, 山本 衛, M. F. Larsen, S310-32 号機ロケット放出 TMA で誘起された発光現象の機構, 第 3 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 1 月 9~10 日.
- 深尾 昌一郎, Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (EPIC): Overview, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.
- 山本 衛, 深尾 昌一郎, 横山 竜宏, 斎藤 享, M. F. Larsen, P. A. Bernhardt, R. F. Pfaff, R. T. Tsunoda, 早川 基, SEEK-2 観測に基づくスプラディック E 層の構造に関する研究, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.
- 中村 卓司, 津田 敏隆, MLT 観測キャンペーン(MLT2003)の報告, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.
- 横山 竜宏, 山本 衛, 深尾 昌一郎, R. Pfaff, スプラディック E 層に伴う分極電界の生成に関する研究, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.
- 小澤 雄一郎, 山本 衛, 深尾 昌一郎, 大塚 雄一, 赤道大気レーダーによる低緯度沿磁力線イレギュラリティの研究, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.
- 丸本 雅人, 斎藤 享, 山本 衛, 深尾 昌一郎, SEEK-2 観測キャンペーンにおける電離圏 E 領域イレギュラリティのレーダー観測, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.
- 津川 卓也, 斎藤 昭則, 大塚 雄一, GEONET 全電子数観測による大規模伝搬性電離圏擾乱の統計

的研究, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.

荒川 真木子, 佐藤 光輝, 高橋 幸弘, 福西 浩, 田村 竜一, SEEK-2 観測キャンペーンにおける人工オーロラ発光の立体構造, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.

川村 誠治, N. Balan, 中村 卓司, 五十嵐 喜良, 塩川 和夫, 大塚 雄一, 深尾 昌一郎, MU レーダーによる地磁気擾乱時電離圏・熱圏・中間圏同時観測, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.

齋藤 昭則, 赤道異常ピークよりも高い緯度に現れるプラズマ・バブルの性質, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

横山 竜宏, 山本 衛, 堀之内 武, R. B. Cosgrove, 深尾 昌一郎, スポラディック E 層に伴う分極電界の生成と E-F 層カップリングに関する研究, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

丸本 雅人, 齋藤 享, 山本 衛, 深尾 昌一郎, R. T. Tsunoda, SEEK-2 観測キャンペーンにおける中緯度電離圏 E 領域プラズマイレギュラリティの空間構造の研究, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

小川 忠彦, 佐川 永一, 大塚 雄一, 塩川 和夫, T. J. Imme, H. U. Frey, S. B. Mende, P. Wilkinson, 大気光プラズマバブルと IMAGE 衛星で観測された電離圏大規模構造との比較, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

大塚 雄一, 塩川 和夫, 小川 忠彦, 横山 竜宏, 山本 衛, 深尾 昌一郎, 大気光・レーダー同時観測によるプラズマバブルと沿磁力線不規則構造の空間構造の比較, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

小野間 史樹, 大塚 雄一, 小川 忠彦, 塩川 和夫, 山本 衛, 齋藤 昭則, GPS, 大気光イメージャー, MU レーダーおよびイオノゾンデの同時観測による F 領域電子密度擾乱の研究, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

小竹 論季, 大塚 雄一, 小川 忠彦, 齋藤 昭則, 津川 卓也, IGS データを用いた中規模伝搬性電離圏擾乱活動度の統計解析, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

Maruyama, T., G. Ma, and M. Nakamura, Interpretation of ionospheric storms based on GEONET-TEC maps and ionosonde chain, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

齋藤 享, 山本 衛, 丸本 雅人, MU レーダーを用いた電離圏 FAI の 8 チャンネル干渉計観測, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

荒川 真木子, 福西 浩, 高橋 幸弘, 佐藤 光輝, 山本 衛, 小野 高幸, 塩川 和夫, 齋藤 昭則, 山本 真行, Larsen Larsen, 田村 竜一, SEEK-2 キャンペーンにおいて観測された TMA 誘起発光

現象の高度決定, 第 114 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 富山大学, 2003 年 10 月 31~11 月 3 日.

山本 衛, 深尾 昌一郎, 横山 竜宏, 丸本 雅人, 早川 基, R. T. Tsunoda, SEEK-2 と MU レーダーによる電離圏イレギュラリティの研究, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

中村 卓司, 藤井 淳介, 津田 敏隆, 塩川 和夫, MU レーダーと FPI の同時観測, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

齋藤 昭則, 大島 浩嗣, 山本 衛, 中緯度 F 領域沿磁力線不規則構造の MU レーダーによる観測, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

齋藤 昭則, 津川 卓也, GPS 受信機網による電離圏全電子数観測とその応用, 第 17 回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2003 年 2 月 27~28 日.

小川 忠彦, 大塚 雄一, 小野間 史樹, 塩川 和夫, 山本 衛, MU レーダー低高度 QP エコーと中性大気変動, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

小川 忠彦, 大塚 雄一, 山本 衛, MU レーダーQP エコーに伴う分極電場ドップラースペクトル解析結果一, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

塩川 和夫, 大塚 雄一, 小川 忠彦, 中村 卓司, 津田 敏隆, 山本 衛, 深尾昌一郎, 超高層大気イメージングシステム (OMTIs) と MU レーダーによる中間圏・熱圏の同時観測, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

大塚 雄一, 塩川 和夫, 小川 忠彦, 齋藤 昭則, 大島 浩嗣, 大気光イメージャーによる中規模伝搬性電離圏擾乱の磁気共役点観測, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

小竹 論季, 大塚 雄一, 小川 忠彦, 齋藤 昭則, 津川 卓也, 深尾 昌一郎, 川村 誠治, 国土地理院 GPS 観測網と MU レーダーを使用した中規模伝搬性電離圏擾乱の研究, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

小野間 史樹, 大塚 雄一, 塩川 和夫, 小川 忠彦, 山本 衛, 齋藤 昭則, MU レーダーおよび大気光イメージャーの同時観測による E 領域・F 領域イレギュラリティの比較, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

高橋 幸弘, 佐藤 光輝, 足立 透, 大久保 敦史, MU レーダーによるスプライト・エルブスの検出, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

齋藤 享, 山本 衛, 丸本 雅人, MU レーダーを用いた電離圏 FAI の 8 チャンネル干渉計観測, 第 4 回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

川村 誠治, N. Balan, 中村 卓司, 山本 衛, 深尾 昌一郎, 五十嵐 喜良, 村山 泰啓, 塩川 和夫, 大塚 雄一, 電離圏・熱圏・中間圏同時観測キャンペーン(MTEC)で得られた上層大気の地磁

気擾乱応答, 第4回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

川村 誠治, N. Balan, 深尾 昌一郎, MU レーダー観測に基づく熱圏中性大気風速の太陽活動度依存性, 第4回 MU レーダーシンポジウム, 京都大学, 2003 年 12 月 2~3 日.

中村 卓司, 津田 敏隆, 福島 徹也, MLT 領域の微細構造およびグローバル構造の協同観測, 第18回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2004 年 2 月 26~27 日.

横山 竜宏, 堀之内 武, 山本 衛, 深尾 昌一郎, 大気重力波による中緯度電離圏 E 領域の変動に関する数値シミュレーション, 第18回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2004 年 2 月 26~27 日.

丸本 雅人, 山本 衛, 深尾 昌一郎, 斎藤 享, SEEK-2 観測キャンペーンにおける中緯度電離圏 E 領域イレギュラリティの空間構造に関する研究, 第18回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2004 年 2 月 26~27 日.

前川 暁紀, 山本 衛, 丸本 雅人, 横山 竜宏, 深尾 昌一郎, MU レーダー干渉計観測に基づく電離層 E 領域沿磁力線イレギュラリティの空間構造に関する研究, 第18回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2004 年 2 月 26~27 日.

多山 哲郎, 深尾 昌一郎, 山本 衛, 横山 竜宏, 赤道大気レーダー多ビーム観測による低緯度電離圏イレギュラリティの研究, 第18回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2004 年 2 月 26~27 日.

大島 浩嗣, 斎藤 昭則, 津川 卓也, 松永 圭左, 2003 年 11 月 4 日の地磁気擾乱時に観測された日本上空における電離圏擾乱について, 第18回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2004 年 2 月 26~27 日.

荒川 真木子, 高橋 幸弘, 福西 浩, 田村 竜一, SEEK-2 ロケット実験において観測された TMA 誘起発光現象の高度プロファイル比較, 第18回大気圏シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2004 年 2 月 26~27 日.

IV 研究経過

1. 研究の概要

地球大気の電離圏のうち高度 90~140km に広がる電離圏 E 領域における大気の電離度は、わずか 10^{-7} 程度しかないので、中性大気がプラズマに与える影響が極めて大きい。この領域は、大気の力学的振舞いが中性気体のそれから電離気体にうつりかわる遷移領域である。特異な現象として古くから知られるスポラディック E 層(E_s 層)は、プラズマが背景の中性大気風速のシアによって特定高度に吹き寄せられ、極めて電子密度が高く薄い層が突発的に発達する現象とされ、通信や放送に障害を引き起こすが、その性質は未だ明らかではない。研究代表者らは、MU レーダーによる中緯度 E 領域の沿磁力線イレギュラリティ(Field-Aligned Irregularity; FAI)観測から、1989 年に「準周期(Quasi-Periodic; QP)エコー」と呼ばれる規則的な波状構造を発見した。QP エコーは E_s 層との相関が高く、夏季の夜間に現れ、周期数分から十数分でレーダーに近づく方向の規則正しい位相伝搬を示すものであり、その極めて特異な振舞いから、国内外の多くの研究者の興味を引付けることになった。中緯度 E 領域の FAI そのものは、 E_s 層の強い電子密度勾配に電界が加わった時に生じるグラディエント・ドリフト不安定に起因するとされているが、そこに卓越する準周期構造の成因は明らかではない。本研究は、QP エコーの生成機構を明らかにすることを主目的として、平成 14 年度と 15 年度の 2 年間にわたって実施された。2002 年 8 月に行われたロケットとレーダーを組合せた総合観測キャンペーン SEEK-2 (Sporadic-E Experiment over Kyushu 2)の地上観測部分の実施とデータ解析が、その計画の中心である。SEEK-2 は、1996 年に実施された初回の SEEK 観測の成果をもとに計画されたものであり、ロケットによる電離圏プラズマの諸パラメータの測定、中性大気風速の測定、地上観測装置によるイレギュラリティの観測などを統合した、更に進んだ観測を行った。表 1 に示すように、SEEK-2 は、本研究の研究組織のみならず、日本・米国・台湾からの多くの研究者の参加を得て、無事、成功裡に実施された。

表 1 SEEK-2 参加研究機関と観測装置(ロケット観測の略称については表 2 参照)

研究機関 [SEEK-2 における役割]	観 測 装 置
宇宙科学研究所 [ロケット観測の統括実施]	ロケット/FLP
京都大学宙空電波科学研究センター	ロケット/EFD, TMA, DBB, 地上/FAI レーダー
[SEEK-2 の提案と観測コーディネート]	
京都大学大学院理学研究科	ロケット/TMA, DBB, 地上/FAI レーダー
東京大学大学院理学研究科	ロケット/IAF
東北大学大学院理学研究科	ロケット/NEI, PWM, 地上/大気光イメージャ
名古屋大学太陽地球環境研究所	地上/大気光イメージャ, GPS シンチレーション
東海大学	ロケット/MGF
独立行政法人 通信総合研究所	ロケット/FBP, 地上/大気光イメージャ, アイオノゾンデ, MF レーダー
米国・航空宇宙局(NASA)、コーネル大学	ロケット/EFD
米国・クレムソン大学	ロケット/TMA
米国・テキサス大学	ロケット/DBB
米国・SRI International	地上/FAI レーダー
台湾・国立中央大学	地上/FAI レーダー

2. SEEK-2 の概要

SEEK-2 の観測領域を図 1 に示す。実験では、種子島に設置された 2 機のレーダー(図中の①と②)によって E_s 層に伴う電離圏 FAI の準周期構造を観測中に、宇宙科学研究所鹿児島宇宙空間観測所(KSC)から観測ロケット(S-310-31 と-32 号機)を連続して打上げることを目指した。表 2 に示すように、観測ロケットからは搭載機器によって E_s 層付近の電子密度、温度、電界、磁界を直接測定するとともに、ロケット搭載の 2 周波ビーコン送信機の電波を地上観測点で E_s 層の全電子数を観測するロケットビーコン実験(両方のロケットで実施)及び、ロケット搭載の圧力容器から TMA (トリメチルアルミニウム)を噴出して発光雲を生成し地上のカメラから連続撮影することで中性大気風速を測定する TMA 観測も実施された。

図 1 及び表 3 に示すように、SEEK-2 では更に種子島から幡多(高知県)にかけて計 9 個所の地上観測点を設置した。上記のように種子島の南部(TNS)と北部(TNN)にそれぞれ京都大学宙空電波科学研究センターと米国・SRI International のレーダーを設置し、電話回線で KSC と結んで観測状況をリアルタイム表示するシステムを構築した。更にロケットビーコン実験及び TMA 実験のための地上観測点、並びに、アイオノゾンデ、MF レーダー、大気光イメージャ、GPS シンチレーション受信機からなる地上観測体制を敷いた。

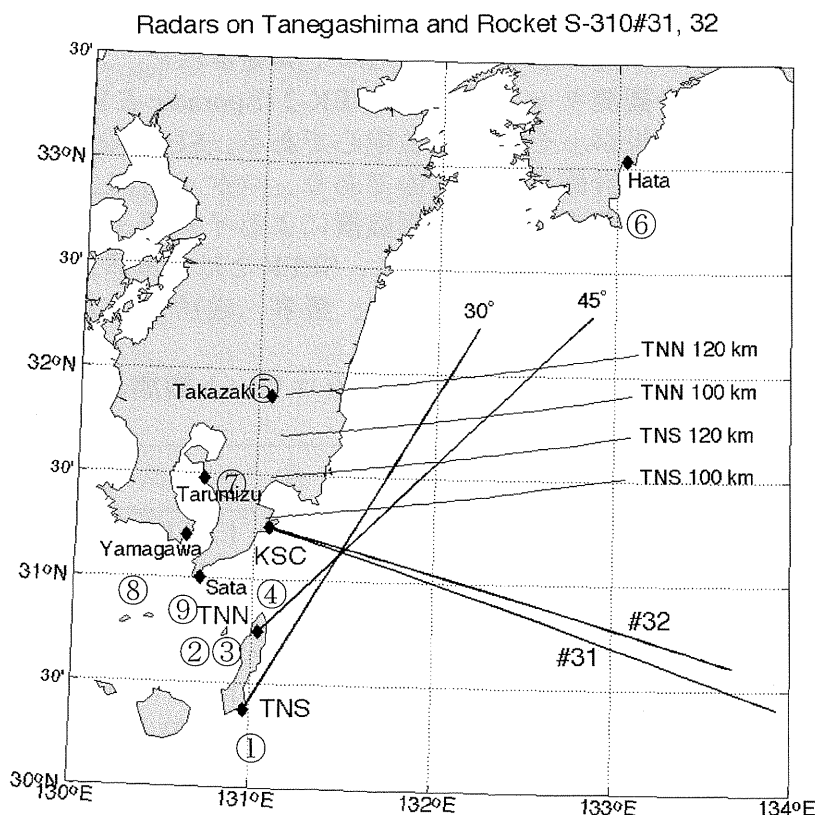


図 1 SEEK-2 観測領域と地上観測点の分布。ロケット S-310-31/32 号機の軌跡と、種子島南部(TNS)と北部(TNN)からのレーダー観測方向を示す。(図中の数字は表 3 に示す地上観測点の番号に対応)

表 2 SEEK-2 ロケット観測 (実施項目に丸印)

ロケット観測項目 (略称)	S-310 ロケット		搭 載 機 器 等
	31 号機	32 号機	
電界 (EFD)	○		ダブルプローブ
中性大気風速 (TMA)		○	TMA 圧力容器+地上設置カメラ(3 個所)
Es 層の全電子数 (DBB)	○	○	ロケットビーコン+地上設置受信機(3 個所)
プラズマ密度プロファイル (NEI)	○	○	インピーダンスプローブ
プラズマ密度変動 (FBP)	○		固定バイアスプローブ
電子温度・密度 (FLP)	○		ラングミュアプローブ
プラズマ波動 (PWM)		○	プラズマ波動モニタ
磁場 (MGF)	○	○	高感度磁力計
ロケット姿勢 (IAF)	○	○	撮像姿勢計

表 3 SEEK-2 地上観測の構成 (図 1 に観測点の位置を示す)

地 上 観 測 点	観 測 内 容
1. 南種子(NASDA 種子島宇宙センター)	FAI レーダー(種子島南部レーダー)
2. 西之表(種子島牧場)	FAI レーダー(種子島北部レーダー)、TMA カメラ、大気光イメージャ
3. 西之表(あっぱーランド)	DBB 受信機
4. KSC(鹿児島宇宙空間観測所)	TMA カメラ、ビーコン受信機、大気光イメージャ
5. 高崎(高崎町たちばな天文台)	TMA カメラ、ビーコン受信機、大気光イメージャ
6. 幡多(高知県立幡多青少年の家)	TMA カメラ
7. 垂水(名大 STE 研観測所)	ビーコン受信機、GPS シンチレーション受信機
8. 佐田岬(名大 STE 研観測所)	大気光イメージャ
9. 山川(通総研観測所)	アイオノゾンデ、MF レーダー

3. 研究実施内容

本研究において、各年度に実施した SEEK-2 に直接関わる研究内容は下記のとおりである。

平成 14 年度

1. 種子島に 2 機のレーダー(下部熱圏プロファイラーレーダー及び Frequency Agile Radar)を設置し、高知、高崎(宮崎)、内之浦、種子島に TMA 発光雲の写真観測点及びロケットビーコン電波の地上受信点等を設置するなど、SEEK-2 観測の準備を進めた。その他の地上観測として、大気光イメージャ観測、衛星電波シンチレーション観測、イオノゾンデ観測、MF レーダー観測などを実施した。
2. 2002 年 8 月 3 日 23 時～24 時の期間、種子島設置のレーダーにより非常に強い FAI を観測中に、KSC からの観測ロケット 2 機の連続打上げ(15 分間隔)に成功した。ロケット搭載機器は全て順調に動作し、地上観測も成功裡に実施された。
3. 2003 年 3 月に SEEK-2 ワークショップを開催し、観測データの相互比較と中緯度 E 領域 FAI に関する議論を行った。

以上の研究から、SEEK-2 観測の直接の成果として次のような成果を得た。

- 高度 90～110km には数層の E_s 層が観測された。
- 高度 93km から 110km では $\pm 5\text{mV/m}$ 程度の電界の大きな揺らぎが見られ、高度 120km 以上では、波長 10km 程度のゆっくりした変動成分が検出された。電界変動の強い高度域とレーダーエコー強度の大きい高度域の一致が明らかになった。
- TMA 放出実験によって風速観測が行われた一方、TMA 発光雲の下部において人工オーロラと見られる発光現象が観測された。
- 2 機のレーダー観測から、E 領域 FAI の準周期構造には、南西方向に向かう波動構造が見出された。
- FAI エコー強度とアイオノゾンデ観測による E_s 層パラメータ (fE_s - fbE_s) に強い相関が見られ、 E_s 層の不均一性と FAI の強い関係が見出された。

平成 15 年度

1. 種子島に設置した 2 機のレーダー観測データの詳細な解析を進めた。干渉計観測から、E 領域 FAI に見られる空間構造が主としてスプラディック E 層の水平不均一性によって発生していることが見出された。強い不均一構造によって、レーダー電波が屈折を受ける様子が計算機シミュレーションから明らかになった。
2. 中緯度電離圏 E 領域の力学構造を調べるため、3 次元の計算機シミュレーションを開発し、SEEK-2 ロケット観測結果等をもとに研究を進めた。その結果、中性大気風速の強いシア(速度の高度変化)による強いスプラディック E 層が現れること、分極電界の効果によって 2 次的な電子密度のピークが説明されることが明らかになった。更に大気重力波のシミュレーション結果を取り入れることで、大気重力波の効果によって E 領域 FAI の空間構造が生成される可能性が示唆された。
3. MU レーダーと大気光イメージャの組合せによる電離圏 F 領域と E 領域のカップリングに関する研究が行われ、電離圏の 2 つの領域が分極電界を通じて相互作用している状況が観測された。これは将来における研究発展の方向を示す重要な成果である。

本研究では、SEEK-2 の実施とそのデータに基づく研究と並行して、MU レーダーや光学観測装置を用いた中緯度 E 領域 FAI の研究や、電離圏・下部熱圏高度の大気重力波の研究を進めた。また赤道大気レーダーなどを利用した、低緯度電離圏イレギュラリティに関する研究も積極的に推進した。「III 研究発表」に示したように、これらの成果として国際学術論文誌に 32 編の論文が発表されている。また口頭発表に関しては、SEEK-2 に直接関係するものだけをリストしたが、その数は国際シンポジウムにおいて 21 件、国内学会講演会等では 54 件に達している。

本報告書では、まず「V メインレポート」において、SEEK-2 地上観測の中心として本研究で実施した、種子島設置の FAI 観測用レーダー 2 機の観測データ解析をもとに、中緯度 E 領域 FAI の空間構造に関する研究成果を報告する。また「VI 主要関連論文」において、本研究に深く関連する主要な論文を報告する。

SEEK-2 観測キャンペーンにおける中緯度 電離圏 E 領域イレギュラリティの空間構造に関する研究

目次

V メインレポート

第1章	序論	1
第2章	沿磁力線イレギュラリティ (FAI)	9
2.1	SEEK-2 観測キャンペーンにおける	9
2.2	FAI の観測結果	10
	中緯度電離圏 E 領域イレギュラリティの	10
	空間構造に関する研究	10
第3章	SEEK-2 キャンペーンにおけるレーダー観測	13
3.1	観測の概要と目的	13
3.2	レーダー観測の手法	14
3.2.1	2 台のレーダーによる FAI の同時観測	14
3.2.2	UTPR を用いた FAI の空間干渉計観測	17
3.2.3	UTPR を用いた流量エコーによる中性風観測	19
第4章	FAI の空間構造と運動	21
4.1	相互相関解析	21
4.2	流量観測エコーの空間構造	25
4.3	干渉計観測によるエコー領域の移動と中性風の関係	29
第5章	電離層内における電波伝播の影響	37
5.1	レーダー観測によるエコーの分離	37
5.2	FOFDF 法による電波干渉シミュレーション	40
5.3	シミュレーション結果	46
5.4	干渉の不均一性	48
第6章	結論	53
	参考文献	55

SEEK-2 観測キャンペーンにおける中緯度 電離圏 E 領域イレギュラリティの空間構造に関する研究

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	沿磁力線イレギュラリティ (FAI)	3
2.1	FAI の生成機構	3
2.2	過去の観測結果	6
2.2.1	MU レーダーによる電離圏 E 領域 FAI の観測	6
2.2.2	準周期エコーの生成モデル	8
2.2.3	FAI の空間干渉計観測	9
第 3 章	SEEK-2 キャンペーンにおけるレーダー観測	13
3.1	観測の概要と目的	13
3.2	レーダー観測の手法	14
3.2.1	2 台のレーダーによる FAI の同時観測	14
3.2.2	LTPR を用いた FAI の空間干渉計観測	17
3.2.3	LTPR を用いた流星エコーによる中性風観測	19
第 4 章	FAI の空間構造と運動	21
4.1	相互相関解析	21
4.2	準周期エコーの空間構造	25
4.3	干渉計観測によるエコー領域の移動と中性風の関係	29
第 5 章	電離層内における電波屈折の影響	37
5.1	レーダー観測によるエコーの分布	37
5.2	FDTD 法による電磁界シミュレーション	40
5.3	シミュレーション結果	46
5.4	E_s 層の不均一性	48
第 6 章	結論	53
	参考文献	55

第1章 序論

地球を取り巻く大気の分子、原子は、地表付近ではほとんどが中性粒子として存在しているが、電離圏と呼ばれる高度約 50 km 以上の領域では太陽からの放射に含まれる紫外線の吸収により、一部が電離した状態で存在している。電離圏は、電子密度の高度分布により *D* 領域 (90 km 以下)、*E* 領域 (90 ~ 150 km)、*F* 領域 (150 ~ 500 km) の3つの領域に分類されている [1]。本研究の対象となる沿磁力線イレギュラリティ (Field-Aligned Irregularities; FAIs) は電子密度の不安定が地球の磁力線直交方向に成長するプラズマ不安定現象であり、電離圏 *E* 領域及び *F* 領域において発生する。このような不規則構造の存在により、電波は回折や散乱等の影響を受けて不規則に変化するため、放送や、測位、グローバルな環境の計測等様々な分野で衛星通信が盛んとなった現在において、FAI の生成機構や構造の解明は極めて重要な研究課題である。また、中性大気と電離大気との相互作用、下層大気と超高層大気との相互作用が地球大気に重要な役割を果たしていると考えられており、地球環境を理解する上でも FAI の研究は重要であると言える。

初期の電離圏の研究はアイオノゾンデによる観測を中心に行われてきた。その後、1974 年にペルーの Jicamarca において、強力な電波を放射し、電子1個1個からの超微弱な Thomson 散乱を受信する IS (Incoherent Scatter) レーダーによる観測が行われ、電離圏観測の有効な手段であることが示された。また、Jicamarca レーダーは FAI からの強い反射エコーの観測にも極めて有効であることが明らかとなり、それ以降、磁気赤道域、極域における FAI の研究は飛躍的に進展し、FAI の様々な特徴が明らかにされてきた [2]。一方、中緯度域における FAI の研究は磁気赤道域、極域と比較して遅れていた。1984 年に京都大学超高層電波研究センター (現、宙空電波科学研究センター) によって滋賀県信楽町 (34.85°N, 136.10°E) に建設されたアジア域初の中・高層大気観測レーダーである MU (Middle and Upper Atmosphere) レーダーは、中緯度電離圏に関して数多くの研究成果を収めてきている [3, 4]。

MU レーダーによる電離圏 *E* 領域 FAI の観測は 1980 年代末より行なわれ、準周期エコー (Quasi-Periodic echoes; QP エコー) と名付けられた高度約 100 ~ 130 km の広い範囲に出現し、数分間隔で強弱を繰り返す筋状の FAI エコーの存在が明らかとなった [5]。その後、準周期エコーの空間構造の解明を目的として、

1996年8月下旬に鹿児島県において日米共同の観測ロケットと地上レーダー観測実験である SEEK (Sporadic-*E* Experiment over Kyushu) キャンペーンが初めて実施された [6]。さらに、SEEK キャンペーンの観測結果とその後の研究の進展を踏まえて、2002年7月下旬から8月上旬にかけて SEEK-2 (Sporadic-*E* Experiment over Kyushu-2) と呼ばれる観測キャンペーンが実施された。

本研究の目的は、SEEK-2 キャンペーンにおいて導入された2台の電離圏観測レーダーによる観測結果から、準周期エコーの空間構造の成因に関する考察を行うことである。具体的には、エコー領域の移動とその原因を調べるとともに、屈折の影響等を検証することで、中緯度電離圏 *E* 領域における準周期エコーの物理現象の解明を目的とする。

本論文の構成を以下に述べる。第2章では FAI の生成機構や中緯度電離圏 *E* 領域における過去の研究成果について述べる。第3章では SEEK-2 キャンペーンにおけるレーダー観測の概要と目的を述べ、2台のレーダーによる FAI の同時観測、LTPR を用いた FAI の空間干渉計観測と流星エコーによる中性風観測の手法について述べる。第4章ではレーダー観測の解析結果から、準周期エコーの筋状構造の時間、空間的な振る舞いを明らかにする。また、干渉計観測と中性風観測の結果から、エコー領域の移動と構造に関する考察を行なう。第5章ではレーダー観測、計算機シミュレーションの結果から、電離層内における電波の屈折の影響に関して考察を行い、 E_s 層の不均一性について議論する。最後に第6章で本論文のまとめと結論を述べる。

第2章 沿磁力線イレギュラリティ (FAI)

2.1 FAIの生成機構

電離圏 E 領域における FAI の観測は、1960 年代からペルーの Jicamarca の IS レーダーにより本格的に開始され、赤道域における FAI の代表的な 2 つの性質が明らかとなった。1 つは地球磁場に対する散乱角依存性が極めて高く、磁力線に対して $90 \pm 1^\circ$ の方向からのみ強いエコーが観測されること、もう 1 つは周波数スペクトルの形状から type1、type2 の 2 種類のエコーに分類できることである [1]。type1 エコーの特徴は、スペクトル幅が狭く、平均ドップラー速度がエレクトロ・ジェット領域のイオン音速 (約 360 m s^{-1}) にほぼ等しいことである。このようなエコーはエレクトロ・ジェット領域の電子のドリフト速度がイオン音速を越えたときに観測され、「Modified Two-stream プラズマ不安定」又は「Farley-Buneman プラズマ不安定」と呼ばれる理論で説明される [7, 8]。一方、type2 エコーに見られる特徴としては、スペクトル幅が type1 エコーに比べて広い、また平均ドップラー速度はイオン音速よりも小さく、レーダービームの天頂角の正弦にほぼ比例することが挙げられる。このようなエコーは電子のドリフト速度が小さい場合に観測され、「Gradient-drift プラズマ不安定」と呼ばれる理論で説明される [9, 10, 11]。中緯度域においては、1970 年代末ごろから VHF 帯レーダーを用いた電離圏 E 領域 FAI の観測が行われてきた [12, 13, 14]。その結果、中緯度域における FAI エコーは平均ドップラー速度が小さく、スペクトル幅が広いという赤道域における type2 エコーの特徴を備えていることが明らかとなった。中緯度域においてはイオン音速を越えるような電子のドリフトはほとんど存在しないと考えられることから、主として Gradient-drift プラズマ不安定によって FAI が生成される。

Modified Two-stream プラズマ不安定と Gradient-drift プラズマ不安定は、同じ線形分散方程式より導かれることが知られている [15]。磁気赤道域の E 領域において、 $\exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)]$ に比例する平面波の摂動を仮定し、適切な近似を行った上で電子とイオンに関する運動方程式と連続の式を線形化する。角周波数 ω を実角周波数 ω_r と線形成長率 γ を用いて $\omega = \omega_r + i\gamma$ と表すと、 $|\gamma| \ll \omega_r$ のとき ω_r 、 γ は以下の式で表される。

$$\omega_r = \frac{kv_d}{1 + \psi} \quad (2.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{1+\psi} \left[\frac{\psi}{\nu_i} (\omega_r^2 - k^2 C_s^2) + \frac{\omega_r \nu_i}{k L \Omega_i} \right] - 2\alpha N \quad (2.2)$$

ここで、 v_d は電子の速度とイオンの速度の差、 $\psi = \nu_e \nu_i / \Omega_e \Omega_i$ 、 ν_i 、 ν_e はそれぞれイオン、電子の中性粒子との衝突周波数、 Ω_i 、 Ω_e はそれぞれイオン、電子のジャイロ周波数、 C_s はイオン音速 ($= [k_B(T_i + T_e)/m_i]^{1/2}$ 、 k_B はボルツマン定数、 T_i 、 T_e はそれぞれイオン、電子の温度、 m_i はイオンの質量)、 L はプラズマ密度勾配のスケール長 ($= N(\partial N/\partial z)^{-1}$)、 N はプラズマ密度、 α は再結合率を示す。ただし、簡単のため $\mathbf{k}$ は西向きとし、 $k = |\mathbf{k}|$ とした。式 (2.2) の第1項、第2項はそれぞれ Modified Two-stream プラズマ不安定、Gradient-drift プラズマ不安定を示し、 $\gamma > 0$ のときプラズマ不安定は時間と共に成長する。プラズマの密度勾配と再結合が無視できる場合 ($L \rightarrow \infty$ 、 $\alpha \simeq 0$) に、Modified Two-stream プラズマ不安定が成長するために必要な条件として次式が得られる。

$$v_d > C_s(1 + \psi) \quad (2.3)$$

一方、 v_d がイオン音速よりも十分小さい場合に、Gradient-drift プラズマ不安定が成長するための条件として次式が得られる。

$$v_d > L \left[\frac{\nu_e}{\nu_i \Omega_e} k^2 C_s^2 + 2\alpha N(1 + \psi) \right] (1 + \psi) \quad (2.4)$$

図 2.1 に Gradient-drift プラズマ不安定の発生機構の東西鉛直断面の模式図を示す。ここでは磁気赤道を仮定して、地球磁場ベクトル $\mathbf{B}$ は地表面に並行で北向き (紙面に対して裏から表に向かう方向) に、また電界 $\mathbf{E}_0$ と背景のプラズマ密度勾配 ∇N は鉛直上向きであるとしている。ただし、 $\mathbf{E}_0 = \mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}$ ($\mathbf{E}$ は外部電界、 $\mathbf{U}$ は中性風ベクトル) である。つまり、初期状態として水平方向にはプラズマ密度が一定であり、高度が上昇するにつれて密度が大きくなる。このような仮定のもとで、図の実線の正弦波で表されるような水平方向に対してプラズマ密度の不均一が生じた場合を考える。このとき、イオンと電子のドリフト速度 $\mathbf{v}_i$ 、 $\mathbf{v}_e$ は以下の式で表される [1]。

$$\mathbf{v}_i = \frac{k_i}{1 + k_i^2} \frac{\mathbf{E}_{0\perp}}{B} + \frac{1}{1 + k_i^2} \frac{\mathbf{E}_{0\perp} \times \mathbf{B}}{B} + \frac{e}{m_i \nu_i} \mathbf{E}_{0\parallel} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{v}_e = -\frac{k_e}{1 + k_e^2} \frac{\mathbf{E}_{0\perp}}{B} + \frac{1}{1 + k_e^2} \frac{\mathbf{E}_{0\perp} \times \mathbf{B}}{B} - \frac{e}{m_e \nu_e} \mathbf{E}_{0\parallel} \quad (2.6)$$

ただし、 $k_i = \nu_i / \Omega_i$ 、 $k_e = \nu_e / \Omega_e$ 、 m_i 、 m_e はそれぞれイオンと電子の質量、 e は

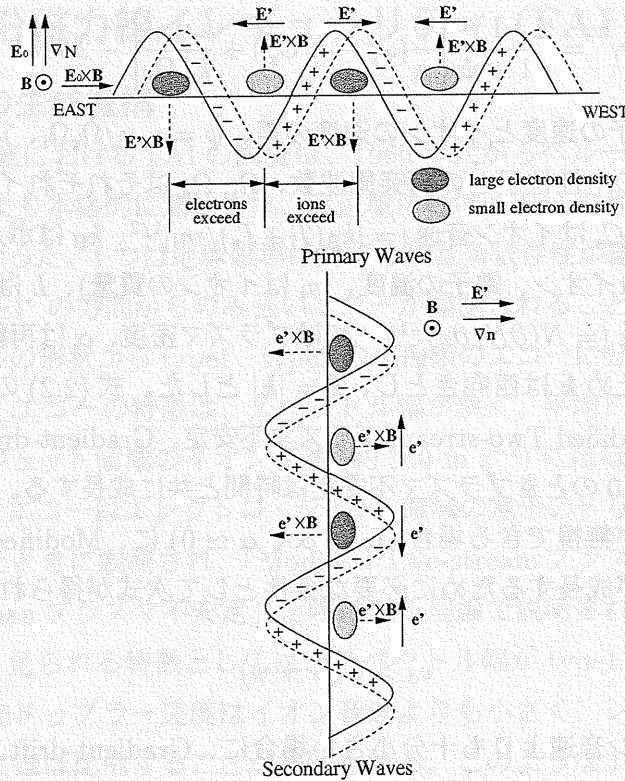


図 2.1: Gradient-drift プラズマ不安定の発生原理図

素電荷、 $E_{0\perp}$ 、 $E_{0\parallel}$ はそれぞれ電界 E_0 の磁力線に対する直交成分、平行成分を表す。電離圏 E 領域の高度 100 km 付近では、図 2.2 に示すように中性粒子との衝突周波数はイオンに比べて電子の方が 1 桁程度大きくなる [1]。一方、電子の質量はイオンの質量に比べて十分小さいため、イオンに比べて電子のジャイロ周波数は極めて大きくなる。このため $k_1 \gg 1$ 、 $k_e \ll 1$ となり、電子は $E_0 \times B$ ドリフトによって西向きに動こうとするが、イオンは中性粒子との衝突の影響が強く、電子と比較してそのドリフト速度は小さい。これよりイオンと電子のドリフト速度に差が生まれ、それぞれの密度分布が図の実線、破線のように分離し、分極電界 E' が生じる。この分極電界 E' のために生じる $E' \times B$ ドリフトにより密度の増加した領域は下方へ、密度の減少した領域は上方へと移動するため、プラズマ密度の不均一性はより大きくなり、結果としてプラズマ不安定が成長することになる。このような機構で生成されるプラズマ不安定の波の波長は数十 m で、水平方向に伝搬する。しかし、この現象をレーダーで探知するには、不安定の波の波長がレーダー電波の半波長に相当する数 m スケールで

(Bragg 条件)、鉛直方向に伝搬することが必要である。従って、VHF 帯のレーダーで観測されるような不安定現象は二段階のプロセスを経て生成されることが考えられている [16]。まず、上記のプロセスにより、背景の鉛直密度勾配よりも大きな水平密度勾配と水平ドリフト速度に匹敵する鉛直ドリフトが生じる。その結果、鉛直方向に伝搬する数 m スケールの二次的な Gradient-drift プラズマ不安定の波が生じ、レーダーによる探知が可能となる。図 2.1 に示したような電界、磁場、密度勾配の相対的な配置が成立した場合、赤道域、中緯度域に関わらず、不安定が起り得ることが説明できる。

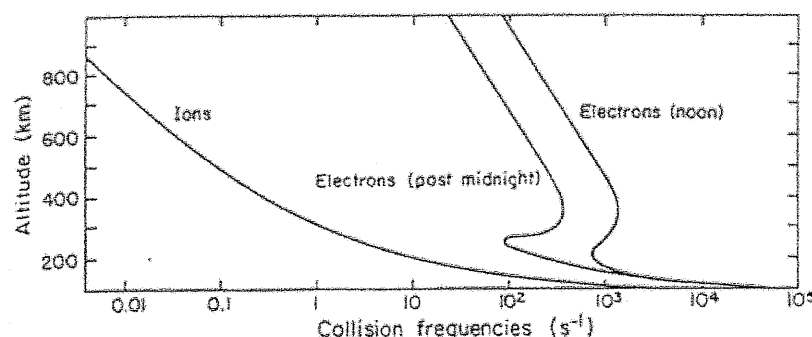


図 2.2: 電子とイオンの中性粒子との衝突周波数に対する高度分布 [1]

2.2 過去の観測結果

2.2.1 MU レーダーによる電離圏 E 領域 FAI の観測

MU レーダーは中心周波数が 46.5 MHz の大気観測用の大型パルスドップラーレーダーで、直径 103 m の円形面内に 475 本の八木アンテナが配置されている。各アンテナ素子には独立に送受信機が取り付けられており、各々のアンテナにおいて独立に位相を電子制御できるアクティブフェーズドアレイシステムを有している。これにより各送信パルス毎に予め設定されている天頂角 30° 以内の 1657 の任意の方向にビーム走査が可能であり、多ビーム観測に有効な特徴を持つ。また、475 本のアンテナを 19 本ずつ 25 群に分け、群を単位として最大 4 つの領域に分割し、それぞれ独立の検波器に接続させることができる。本機能は空間干渉計観測に有効に利用されている。2004 年には「MU レーダー観測強化システム」が導入され、全 25 群での個別のデータ取得が可能となる予定

である。

MU レーダーによる電離圏 E 領域の観測は、1989 年 6 月に 5 ビーム、レンジ分解能 150 ~ 600 m で初めて本格的に行われた。その結果、中緯度電離圏 E 領域には特徴的な 2 種類の FAI エコーが出現することが明らかになり、それぞれ「準周期エコー」、「連続エコー」と名付けられた [5, 17]。図 2.3、2.4 に MU レーダーで観測された典型的な準周期エコーと連続エコーの例を示す。図 2.3 は 1990 年 6 月 20 日 21 時 30 分から 23 時 30 分に観測された準周期エコー、図 2.4 は 1991 年 6 月 5 日 5 時 30 分から 7 時 30 分に観測された連続エコーである。準周期エコーは日没後に広い高度範囲 (約 100 km ~ 130 km) にわたって出現し、数分間隔で強弱を繰り返すような筋状の構造を持つ。一方、連続エコーは朝方に狭い高度範囲 (約 90 km ~ 100 km) に出現し、準周期エコーのような細かい構造を持たずに長時間持続して出現するという特徴を持っている。また、MU レーダーによる初期の電離圏 E 領域 FAI 観測の結果、FAI の出現頻度は夏

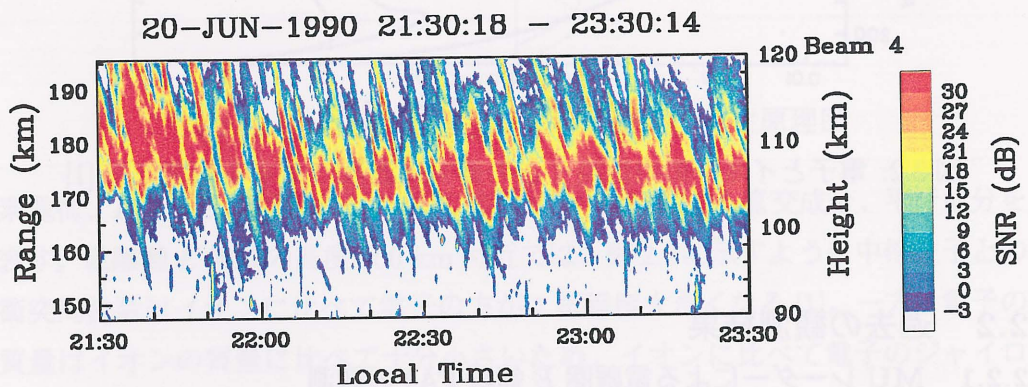


図 2.3: MU レーダーで観測された典型的な準周期エコー

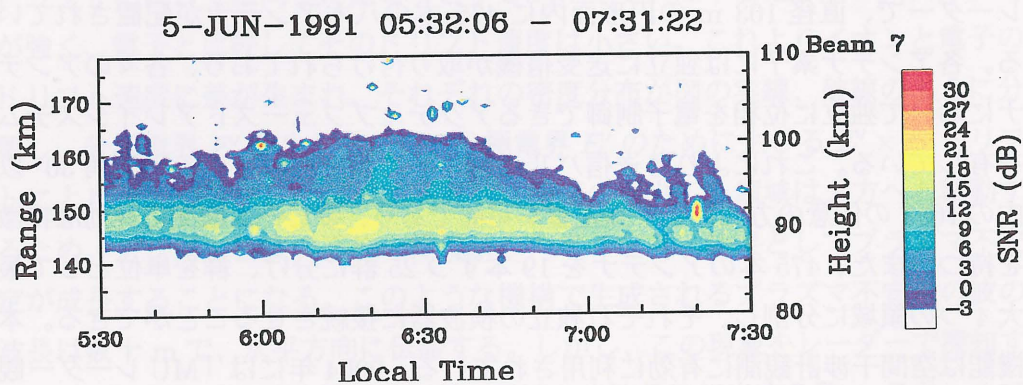


図 2.4: MU レーダーで観測された典型的な連続エコー

季(特に6月)に高いこと、高度100 km付近に出現する非常に高い電子密度を持ったスプラディック E 層 (E_s 層) の出現との相関が高いことが明らかにされた [18, 19]。

準周期エコーは、その特徴的な形態により多くの関心を集め、発見当初から数多くの研究がなされてきた。1991年からは12～16ビームを用いた多ビーム観測で東西約数百 km にわたる空間構造が調べられ、準周期エコーは西向きに見かけの位相速度約 100 m s^{-1} で伝搬していること、また各ビーム方向のドップラー速度を合成した結果、FAI のドリフト速度は西向き及びレーダーから遠ざかる成分を持つことなどが示された [20, 21]。また、1990年から1992年にかけて、数 km スケールの微細な空間構造を調べるために空間干渉計観測が行われ、エコー領域は北西から南東にかけて筋状に伸び、波面は北東から到来することが示された [20, 21]。さらに、1993年には多ビーム観測を行う MU レーダーと米国 SRI International によって開発された Frequency Agile Radar (FAR) との同時観測が行われ、準周期エコーの周期が数分～10分程度でレーダーに向かって位相速度約 60 m s^{-1} ～ 70 m s^{-1} で伝搬していることが分かった [22]。一方、連続エコーに関しては、発見当時に長時間連続的に存在する、朝方の日の出直後に見られる、低い高度(約90 km～100 km)に存在する、準周期エコーに比べてエコー強度が弱いといった特徴が報告された [5]。また、2000年に行われた高分解能を用いた MU レーダー観測により、高度約90 km～100 km に出現する連続エコーの内部にも準周期エコーと良く似た小スケールの筋状構造の存在が確認され、「低高度準周期 (Low-altitude QP; LQP) エコー」と名付けられた [23, 24]。LQP エコーは高度100 km 以下に存在し、エコー強度が比較的弱く、エコーの内部に周期1分程度、高度方向の波長数 km の微細な構造を持っている等の特徴が明らかになっている。これまで準周期エコーに関する研究は数多くなされてきたが、連続エコーに着目した研究はほとんどなされていない。本研究においても対象を準周期エコーに絞り、次節では現在提案されている準周期エコーの生成モデルについて記述する。

2.2.2 準周期エコーの生成モデル

準周期エコーの出現は、 E_s 層の出現と相関が高いことが知られており、 E_s 層の電子密度勾配による Gradient-drift プラズマ不安定が FAI 生成の原因であると考えられている。しかし、薄く水平に広がる E_s 層を仮定しただけでは広い高度範囲にわたって出現する準周期エコーの筋状構造を説明することはできな

い。当初は、準周期エコーの周期や波長等が大気重力波と似通っていたことから、 E_s 層が大気重力波によって高度変調を受け、その結果高度方向に広がった準周期エコーが生成されるとするモデルが提唱されていた [25, 26]。このモデルを検証するために 1996 年に行われた SEEK キャンペーンでは、観測ロケットとレーダーによる同時、同領域の観測が行われた。その結果、 E_s 層は薄く水平に広がっており、大きく高度変調を受けた E_s 層は観測されなかった。また、中性大気にケルビン・ヘルムホルツ不安定 (KHI) が発生し得るほどの大きな中性風の鉛直シアが見つかり、中性風速シアによって E_s 層が生成されるとする仮説が実証された [27]。

現在、準周期エコーの生成機構として以下の 2 つのモデルが提案されている。1 つは図 2.5 の左図に示すように、 E_s 層付近で外部電界または中性風によって分極電界が生成され、生成された分極電界が磁力線に沿って高高度までマッピングされることにより、磁力線に沿ったプラズマ不安定領域が生成されるといったモデルである。このモデルは *Maruyama et al.* [28] によって提唱され、これをサポートする計算機シミュレーションが *Yokoyama et al.* [29, 30] によって行われている。もう 1 つのモデルは図 2.5 の右図に示すように、イレギュラリティは E_s 層内付近にのみ存在し、屈折と有限な散乱角の広がりによって、高度方向に広がった分布が見られるといったモデルである [31]。この 2 つのモデルの正否については現在も様々な議論が行われており、現段階で準周期エコーの空間構造の成因は明確には解明されていない。

2.2.3 FAI の空間干渉計観測

本節では、準周期エコーの微細な空間構造を解明する目的で行われた空間干渉計観測に関するこれまでの観測結果について述べる。空間干渉計観測とは、

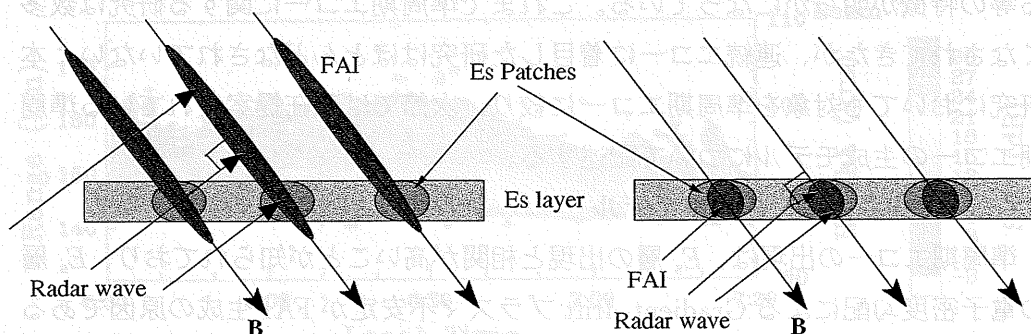


図 2.5: 準周期エコーの生成モデル

空間的に離れて位置する3つ以上のアンテナを用いて同時にエコーを受信し、各アンテナ間で得られる受信信号の位相差からエコーの到来方向を決定する手法である。空間干渉計観測により、ビーム幅より小さいスケールの構造についての情報を得ることが可能となる。

FAIの空間干渉計観測は磁気赤道域に位置するペルーのJicamarcaレーダーにおいて開始され、FAIエコーの東西伝搬や散乱角依存性などの研究に多くの成果を収めてきた[32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]。一方、中緯度域における最初の観測はRiggin *et al.*[40]により報告されている。その後、1990年から1992年にかけて、MUレーダーを用いた1.2 kmの高レンジ分解能の観測が実施され、Riggin *et al.*では十分に議論のされなかったレンジ方向のFAIエコーの分布を中緯度域において初めて精度良く観測した[20, 21]。その結果、図2.6に示すようにレーダーに近づく方向に伝搬する準周期エコーのエコー領域は、北西から南東にかけて筋状に伸びており、波面は北東から到来することが示された。また、同時に2つ以上の筋状のエコー領域が存在し、間隔を約15 km ~ 20 kmに保ちながら南西に伝搬していく様子が見られた。さらに、Range-Time-Intensity (RTI) 図上で見られる筋状構造との関連を調べるために、図2.7の星印とアスタリスクで示した2本の筋状のエコー領域について水平、高度分布の時間変化を調べた。

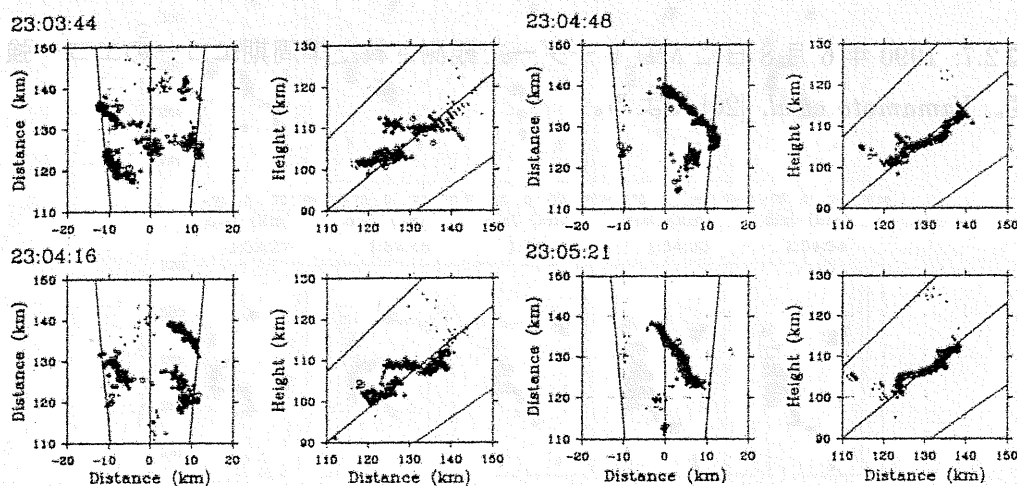


図2.6: 1990年6月8日にMUレーダーによる干渉計観測で得られたエコー領域の水平断面図(左図)と鉛直断面図(右図)。図中の3本の直線は中心がビーム中心方向、両端がビーム中心方向から $\pm 5^\circ$ 離れた位置を示す。Yamamoto *et al.* [20] による。

その結果、図 2.8 に示すように、どちらのエコー領域も一定の高度を保ちながら南西方向へ伝搬することが分かった。しかし、*Yamamoto et al.* [20] で紹介されている本観測の結果において、エコー領域の水平移動と準周期エコーの関係については詳しく述べられていない。1993 年には、台湾において Chung-Li レーダーを用いた空間干渉計観測が実施され、不連続なパッチ状の塊がレーダービーム内を西向きに移動する結果が示された [41]。また、1999 年に米国の Clemson レーダーを用いたレーダーイメージング観測の結果、図 2.9 に示すように台湾の観測例と同様に複数のパッチ状の塊がレーダービームを横切って西に移動する様子が確認された [31]。以上のように、過去に行われた空間干渉計観測の結果からは、準周期エコーの筋状構造はエコー領域がレーダービームを横切って水平移動することによると説明される例が多い。

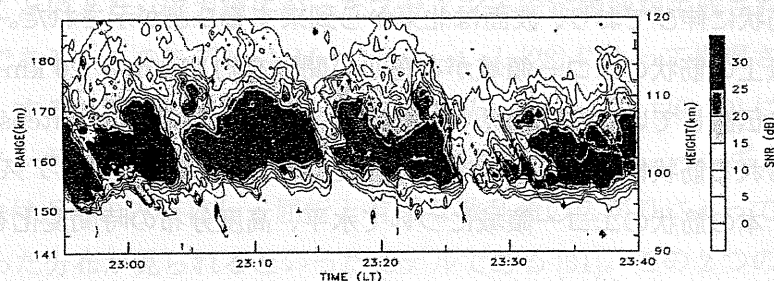


図 2.7: 1990 年 6 月 8 日に MU レーダーで観測された準周期エコーのエコー強度。Yamamoto et al. [20] による。

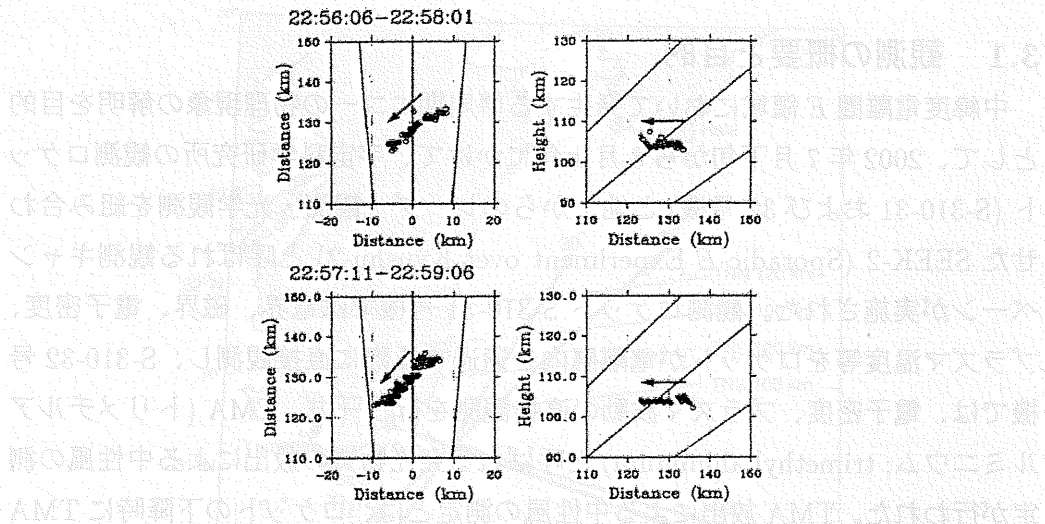


図 2.8: 図 2.7中の星印とアスタリスクで示した筋状のエコー領域の時間変化。上図が星印、下図がアスタリスクで示したエコー領域に対応する。また、左図が水平断面、右図が鉛直断面における時間変化を示している。図中の3本の直線は図 2.6と同様である。Yamamoto *et al.* [20] による。

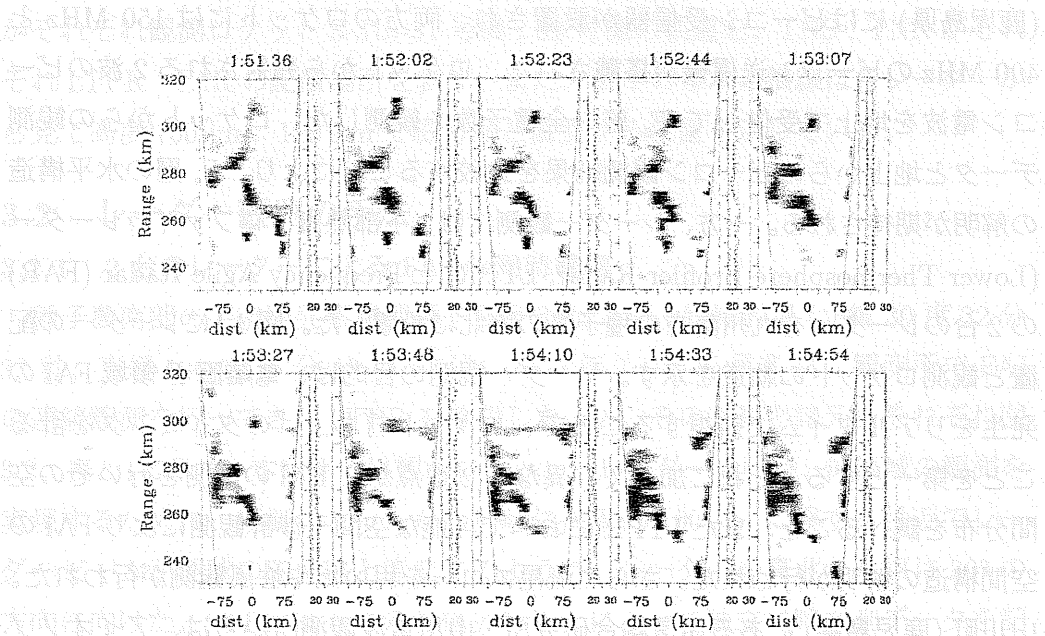


図 2.9: 1999 年 7 月 18 日に Clemson レーダーによるレーダーイメージング観測により得られた FAI エコーの空間構造。レーダービーム内での東西方向に対するレンジの分布を示す。Hysell *et al.* [31] による。

第3章 SEEK-2 キャンペーンにおけるレーダー観測

3.1 観測の概要と目的

中緯度電離圏 E 領域において発生する準周期エコーの物理現象の解明を目的として、2002 年 7 月下旬から 8 月上旬にかけて、宇宙科学研究所の観測ロケット (S-310-31 および 32 号機) と地上からのレーダー観測・光学観測を組み合わせた SEEK-2 (Sporadic- E Experiment over Kyushu-2) と呼ばれる観測キャンペーンが実施された。観測ロケット S-310-31 号機では電界、磁界、電子密度、プラズマ温度等をロケットが電離層内を通過する際に直接観測し、S-310-32 号機では、電子密度、プラズマ波動の直接観測を行う一方、TMA (トリメチルアルミニウム; trimethyl aluminum) と呼ばれる発光物質の放出による中性風の測定が行われた。TMA 放出による中性風の測定とは、ロケットの下降時に TMA を放出し、その発光物質の時間移動を地上の 2 地点以上からの連続写真撮影によって三角測量し、発光領域の 3 次元位置の変化からその領域の風を推定するものである。幡多 (高知県大方町)、高崎町 (宮崎県)、内之浦、西之表市 (鹿児島県) では発光物質を撮影するカメラ観測が行われた。内之浦、垂水、西之表市 (鹿児島県) にはビーコン受信器が設置され、両方のロケットには 150 MHz と 400 MHz のビーコン送信機が搭載された。ロケットから発射される 2 波のビーコン電波を地上で受信して E_s 層の全電子数を観測した。ロケットからの観測データと地上からのビーコン観測結果を比較することにより、 E_s 層の水平構造の解明が期待される。一方、レーダー観測では、下部熱圏プロファイラレーダー (Lower Thermosphere Profiler Radar; LTPR) と Frequency Agile Radar (FAR) の 2 台のレーダーを九州南方の種子島の南北に設置した。図 3.1 にレーダーの配置と観測ロケットの軌道を示す。レーダー観測の目的は、電離圏 E 領域 FAI の発生をリアルタイムで監視することで、ロケット打ち上げのタイミングを計ることを第一とする。それに加えて、異なる 2 地点から FAI の観測を行いその空間分布を調べることで、また LTPR において可能な空間干渉計観測により FAI の空間構造の解明が行われた。さらに流星エコーを用いた中性風観測が行われた。山川町 (鹿児島県) にある通信総合研究所・山川電波観測所からは、アイオノゾンドを用いた電離層の観測と MF (medium frequency) レーダーを用いた中性風の観測が行われた。それぞれ、上記の FAI の観測結果と TMA、流星エコーによる中性風観測との比較に用いることができる。

Radars on Tanegashima and Rocket S-310#31, 32

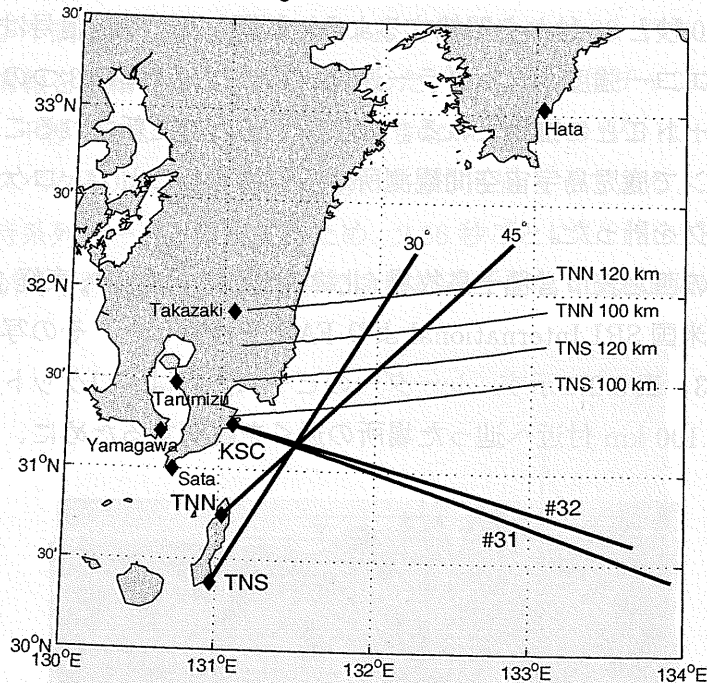


図 3.1: SEEK-2 キャンペーンにおけるレーダー配置とロケットの軌道。#31, #32 がそれぞれ観測ロケット S-310-31 号機, 32 号機の軌道を、TNS, TNN がそれぞれ LTPR, FAR の配置場所を表す。また、図中の 4 本の横線は各レーダーから見て高度 100 km、120 km で磁力線と直交する位置を示している。

3.2 レーダー観測の手法

3.2.1 2 台のレーダーによる FAI の同時観測

種子島南部の宇宙開発事業団種子島宇宙センター竹崎射場 (北緯 30 度 22 分 32 秒、東経 130 度 57 分 48 秒) には、2000 年 7 月から信楽 MU 観測所で FAI の連続観測を行ってきた LTPR を移設した [42]。その写真と諸元をそれぞれ図 3.2、表 3.1 に示す。本観測では観測ロケットとレーダーの同時、同領域の観測を実現するために、観測ロケットが上昇時に高度約 100 km に達する付近でレーダービームが地球の磁力線と直交するように、レーダーを真北から東に 30° の方向に向けた。LTPR は 6 つの受信アンテナによって独立に時系列データを記録しており、干渉計として用いることができる。IPP は 4 ms であるが、変調方式としてコンプリメンタリ符号を用いているため、サンプリング間隔は 8 ms となり、ドップラースペクトルのナイキスト限界は $\pm 296 \text{ m s}^{-1}$ である。1 回

の観測では 2560 点の時系列データを取得するため観測時間は 20.48 秒となり、それを毎分の 0 秒と 30 秒から開始するように制御した。受信信号はリアルタイム処理され、エコー強度、ドップラー速度、スペクトル幅の 3 つのパラメータが各レンジゲートごとに推定される。リアルタイムで更新されるこれらのデータをオンラインで鹿児島宇宙空間観測所から監視することで、ロケット打ち上げのタイミングを計った。

種子島北部の西之表市営種子島牧場 (北緯 30 度 45 分 01 秒, 東経 131 度 01 分 51 秒) には、米国 SRI International より FAR を移設した。その写真と諸元をそれぞれ図 3.3、表 3.2 に示す。レーダーのビーム方向は、ロケットの軌道から磁力線を高度 100 km 付近へ辿った場所の近くを観測するために、真北から東



図 3.2: LTPR のアンテナ写真

表 3.1: LTPR 諸元

送信周波数	31.57 MHz
尖頭出力	24 kW
アンテナ	4 素子八木アンテナ
アンテナ数	9
受信アンテナ数	6
レンジ分解能	1.5 km
変調方式	16 ビット コンプリメンタリ符号
IPP	4 ms

へ 45° に向けた。FAR は LTPR とあわせて FAI の空間分布を観測するとともに、LTPR が不調に陥った場合に、LTPR に代わりロケット打ち上げのタイミングを計る情報を供給することを目的とした。FAR は受信チャンネルが1つしかないため、干渉計として用いることはできない。観測の IPP は 10 ms であり、ドップラースペクトルのナイキスト限界は $\pm 306\text{ m s}^{-1}$ である。1 回の観測では 256 点の時系列データを取得するため、2.56 秒ごとに LTPR と同様の 3 つのパラメータが得られる。FAR は途中で途切れることなく連続観測が行われた。



図 3.3: FAR のアンテナ写真

表 3.2: FAR 諸元

送信周波数	24.515 MHz
尖頭出力	4 kW
アンテナ	4 素子八木アンテナ
アンテナ数	8
受信アンテナ数	1
レンジ分解能	3 km
変調方式	13 ビットバーカー符号
IPP	10 ms

3.2.2 LTPR を用いた FAI の空間干渉計観測

LTPR のアンテナ配置を図 3.4 に示す。6 つの受信アンテナを図のように配置することで複数の異なる基線長を得ることができ、FAI の空間干渉計観測が可能となる。また、東端の三角形をなす 3 本のアンテナ 1, 2, 9 を流星飛跡エコーの観測用として使用している。LTPR では山田 (2002) [42] によって FAI と流星風の同時観測が開発されており、SEEK-2 においても実施した。本解析ではアンテナ 9 を基準にして、アンテナ 9 とアンテナ 1、アンテナ 9 とアンテナ 2 を用いた 2 つの基線を取ることでエコー到来角の推定を行った。また、図 3.5 に LTPR の放射ビームパターン (細線) 及び高度 100 km で磁力線とレーダーの視線が直交する方向 (太線) を示す。FAI の地球の磁力線に対する極めて高い直交性から、エコーは図 3.5 の太線上に分布するものと考えられる。

2 つのアンテナ間で得られる受信信号の位相差は以下のように導出する。受信アンテナ x, y で得られた時系列データ $f_x(t), f_y(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $S_x(\omega), S_y(\omega)$ とすると、アンテナ間のコヒーレンス関数 $C_{xy}(\omega)$ は

$$C_{xy}(\omega) = \frac{\langle S_x(\omega) S_y^*(\omega) \rangle}{\langle |S_x(\omega)|^2 \rangle^{1/2} \langle |S_y(\omega)|^2 \rangle^{1/2}} \quad (3.1)$$

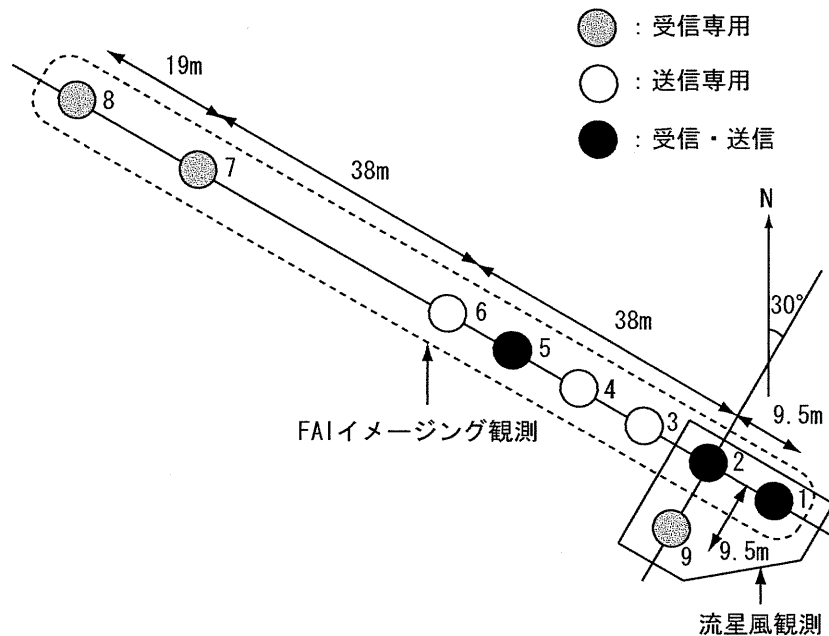


図 3.4: LTPR のアンテナ配置

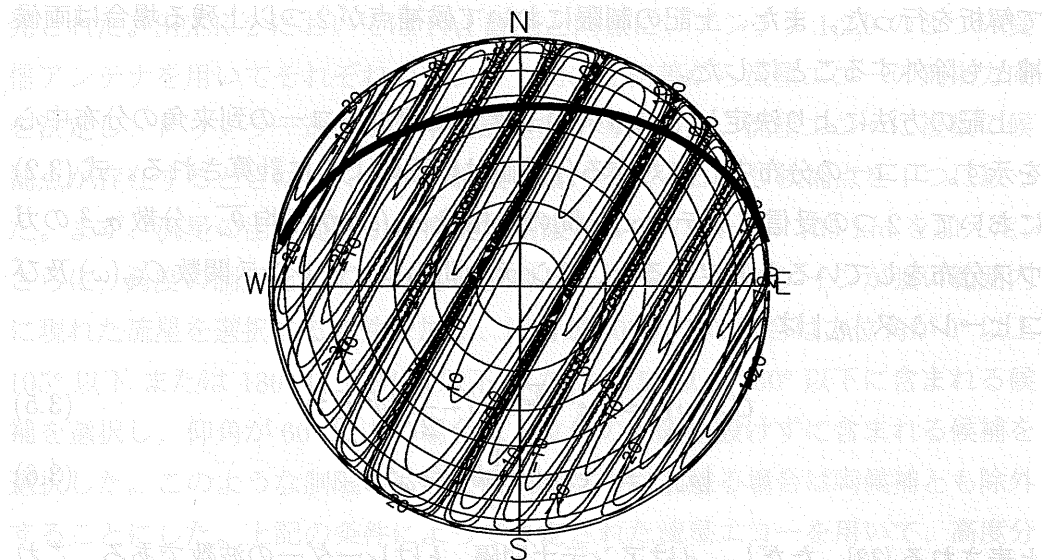


図 3.5: LTPR の放射ビームパターン。中心が天頂（仰角 90° ）を示しており、同心円が外側になるにつれて仰角が 10° ずつ低くなる。最も外側の同心円が水平面を示す。

$$= |\rho(\omega)| e^{i\theta_{xy}(\omega)} \quad (3.2)$$

と表される。 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均を表す。上式から各周波数成分毎に、位相差 $\theta_{xy}(\omega)$ とコヒーレンス $|\rho(\omega)|$ を求めることができる。コヒーレンスは $0 \leq |\rho(\omega)| \leq 1$ の値を取るが、その値が 1 に近いほど信号が空間的に狭い領域から得られることを意味する。位相差はコヒーレンスが最大となる周波数成分を持つ点から順に 3 点の位相の値を選択し、その平均値を用いた。このようにして求めた 2 つの基線における位相差 ϕ_1, ϕ_2 は以下のように表される。

$$\phi_1 = (\mathbf{d}_9 - \mathbf{d}_1) \cdot \mathbf{n} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.3)$$

$$\phi_2 = (\mathbf{d}_9 - \mathbf{d}_2) \cdot \mathbf{n} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.4)$$

ただし、 $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_9$ はそれぞれアンテナ 1, 2, 9 の位置ベクトル、 $\mathbf{n}$ はターゲット方向の単位ベクトルである。式 (3.3)、(3.4) を解くことでエコーの到来方向を三次元的に推定できる。このとき基線長が約 1 波長であるために、候補点が複数考えられる。このため、エコーが磁力線直交方向に近い方向から返ってくることとレーダーのビームパターンを考慮して、方位角が -45° 以上 90° 以下、仰角が 15° 以上 55° 以下という制限を設けることにより、候補点を 1 つに絞っ

て解析を行った。また、上記の制限において候補点が2つ以上残る場合は両候補とも除外することにした。

上記の方法により決定したエコーの三次元位置はエコーの到来角の分布中心を示す。エコーの分布中心に対する分散値は以下のように計算される。式 (3.2) において、2つの受信アンテナ x, y 間の位相差 $\theta_{xy}(\omega)$ が平均 $\bar{\theta}_\omega$ 、分散 σ_ω^2 のガウス分布をしていると仮定すると、アンテナ間のコヒーレンス関数 $C_{xy}(\omega)$ 及びコヒーレンス $|\rho_\omega|$ は

$$C_{xy}(\omega) = e^{ikd\bar{\theta}_\omega} \exp\left(-\frac{1}{2}k^2 d^2 \sigma_\omega^2\right) \quad (3.5)$$

$$|\rho_\omega| = \exp\left(-\frac{1}{2}k^2 d^2 \sigma_\omega^2\right) \quad (3.6)$$

と表される [33]。ただし、 d はアンテナ間隔、 k はレーダーの波数である。これより、分散値 σ_ω^2 は

$$\sigma_\omega^2 = \frac{-2\log_e |\rho_\omega|}{k^2 d^2} \quad (3.7)$$

と表される。

3.2.3 LTPR を用いた流星エコーによる中性風観測

流星は地球外の塵が地球大気圏に突入する際に大気との摩擦で激しく燃える現象で、主に高度 80 km ~ 100 km 付近で発生する。流星はその飛跡に沿って周囲の大気を電離する。流星によって作られたプラズマは、周囲の大気とともに運動しながらレーダー電波を効率良く反射するため、反射波のドップラー速度から中性風速度を導出することができる。流星飛跡によるエコーは 100 ms 程度以下の短時間でエコー強度がノイズレベルから最大に達し、数 100 ms ~ 数分で減少するという特徴的な時間変化を示すため、FAI エコーを含むレーダー観測データ (時系列データ) から容易に検出することができる [43]。また、流星エコーは underdense echo と overdense echo の2種類に分類される。中性風の導出に用いられる underdense echo と呼ばれる流星エコーは、継続時間が overdense echo に比べて短く、エコー強度が指数関数で減衰するといった特徴から overdense echo と区別される。FAI の生成過程には中性風が深く関係すると考えられており、FAI と中性風を同時に観測することにより両者の関係の理解が進むことが期待される。ただし、流星風が推定可能な高度が主として FAI の発生高度領域の下側であるという点に注意が必要である。

LTPR を用いた流星エコーによる中性風観測は、山田 (2002)[42] によって開

発された。SEEK-2 においては FAI 観測と同様に、アンテナ 1,2,9 の 3 つの受信アンテナを用いてそれぞれのアンテナ間の位相差から流星エコーの到来方向を決定し、ドップラー速度から中性風速度を導出した。流星エコーに複数の候補点が存在するときはいくつかの制限を設けることにより候補点を 1 つに絞った。まず、流星の出現範囲から高度の制限として 75 km ~ 105 km を加えた。さらに、角度の制限として LTPR の放射ビームパターンのゲインが強い範囲内に現れた流星を選択する条件を加え、仰角が 60° 以下の場合は方位角が 0° 以上 105° 以下 または 180° 以上 240° 以下 または 315° 以上 360° 以下に含まれる候補を選択し、仰角が 60° 以上の場合は方位角の制限を設けずに含まれる候補を選択した。このような制限のもとで候補が 2 つ以上残る場合は両候補とも除外することにした。上記の条件によって決定された流星エコーを用いて、高度分解能 3 ~ 6 km、時間分解能 2 ~ 3 時間を設定して各時間高度区間内の平均風速を推定した。中性風は、平均風速の各流星方向成分と観測される視線方向風速の差の 2 乗和が最小になるように計算される。このとき、風速の精度を維持するために、各時間高度区間内に最低 5 個以上の流星が存在する場合に中性風の計算を行った。

第4章 FAIの空間構造と運動

4.1 相互相関解析

レーダー観測は2002年7月30日から8月24日までの期間、LTPRは毎日の午後6時から翌朝8時(日本時間)まで、FARは24時間観測を行った。ただし、LTPRは7月30日から8月2日、5日、10日、15日の期間、FARは8月6日、10日から13日の期間が欠測となっている。観測ロケットは2002年8月3日午後23時24分と23時39分に相次いで打ち上げられた。図4.1にFAIの発生率の日変動を示す。縦軸は時間を10分毎に区切り、SN比が5 dB以上のエコーが存在する場合にFAIが発生したとして、各日におけるFAIの発生時間の合計を示している。図4.1よりLTPRとFARで観測されたFAIの日変動がほぼ等しいことが分かる。準周期エコーの発生については、FARを用いた種子島での2か月間の観測で、5-6日の周期変動が見られることが *Tsunoda et al.* [44] によって初めて示された。また、山田(2002)[42]におけるLTPRを用いた観測では、FAIと5日周期の惑星変動との関連が示されている。しかし、本観測でははっきりとした5-6日の周期変動は見られなかった。その理由として、観測期間が短いこと、欠測が多いこと等が考えられる。

ロケット打ち上げ前後には、図4.2、図4.3で示すように南北両方のレーダー

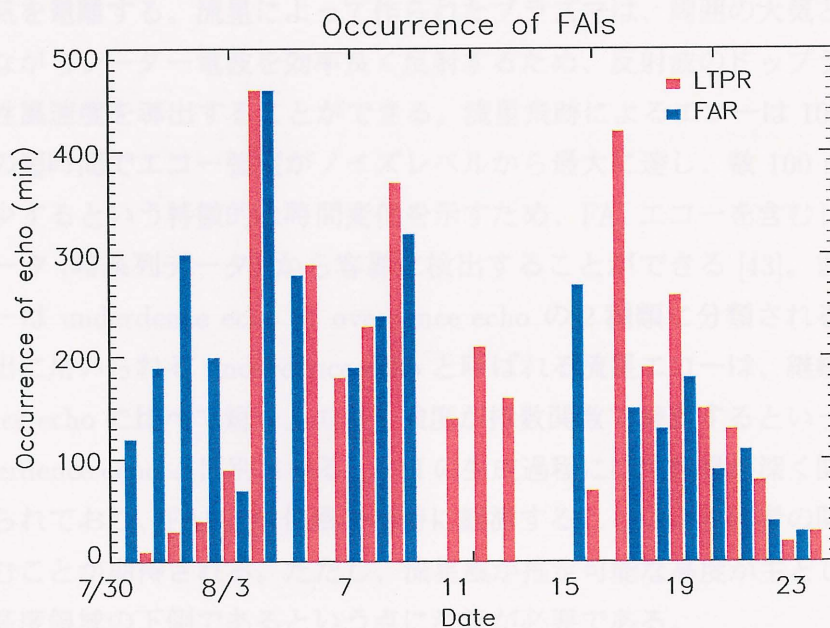


図4.1: レーダー観測期間におけるFAIの発生頻度

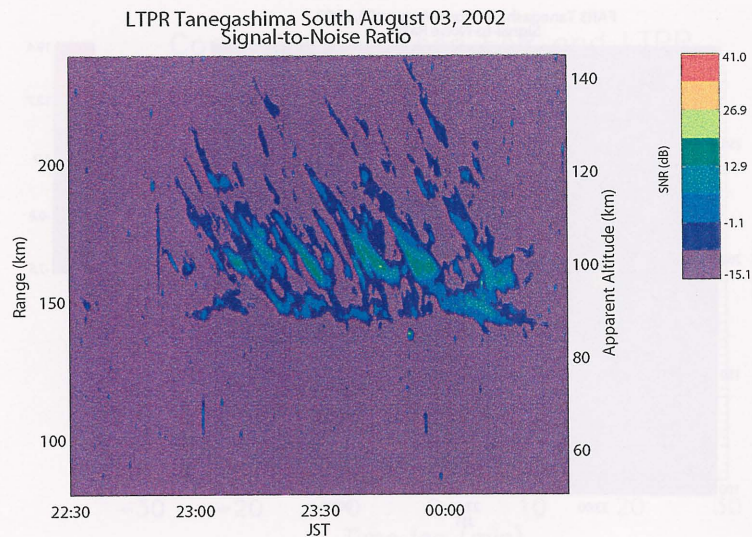


図 4.2: LTPR によりロケット発射前後 (2002 年 8 月 3 日 22 時 30 分から 0 時 30 分) に観測されたエコー強度。右縦軸は方位角 30° で磁力線直交条件よりレンジから換算した見かけの高度である。

で非常に活発な準周期エコーが観測された。LTPR では 23 時 10 分ごろから 0 時 15 分ごろまで複数の筋状のエコーが観測され、FAR では 22 時 50 分ごろから 0 時 00 分ごろまで時間とレンジの分布が良く似たエコーが観測された。これより、FAR の方が約 20 分早くエコーが現れ、大きなスケールを持った構造が伝搬していることが予想される。ここで、RTI 図における高度 (右側の縦軸) は、ビーム中心方向で磁力線直交条件を仮定してレンジから換算した見かけの高度であり、真の高度とは異なるという点で注意が必要である。また、レーダーで観測された準周期エコーは、大半が右下がりの筋状構造をしていた。

観測期間中に 2 台のレーダーで準周期エコーが観測された 20 例について、相互相関解析を行った。解析はエコーの集団が続く 2 時間もしくは 3 時間の区間毎に、2 台のレーダーのそれぞれにおいて SN 比の各レンジゲート毎の平均値を求め、SN 比が最大となる高度に出現したエコーに対して、時間をラグとする相互相関を行った。その結果、図 4.4 に示すように相関値が 0.6 以上となるものが 20 例中 13 例あり、両レーダーで同じ FAI 領域を観測していることが分かる。図 4.5 は相互相関解析で求まる時間差を示している。これより、FAR の方が LTPR よりも平均で 8.4 分早くエコーが観測されることが分かった。以上の結果から、FAI の構造は大きなスケールにおいては北から南に伝搬する場合が多

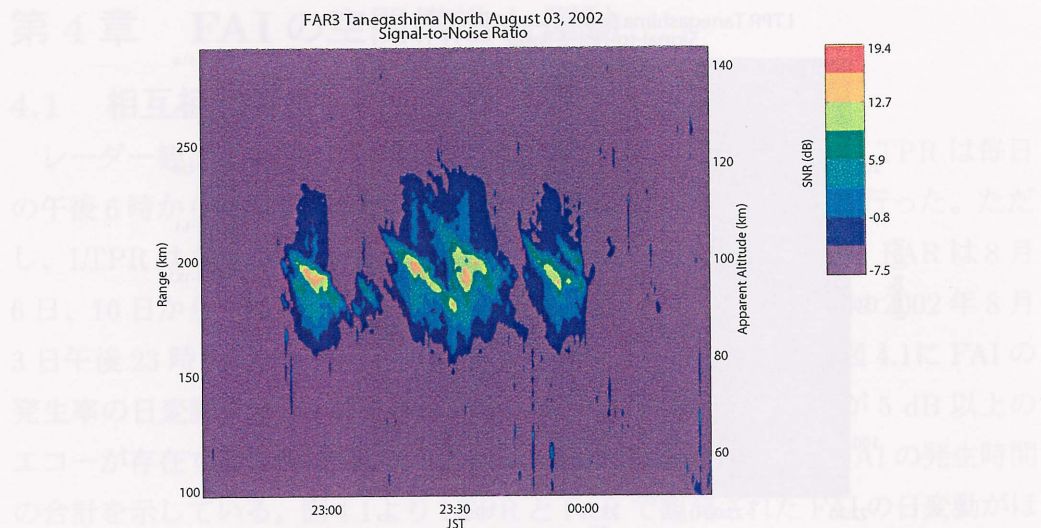


図 4.3: FAR によりロケット発射前後に観測されたエコー強度。高度については図 4.2と同様。ただし、方位角は 45° 方向である。

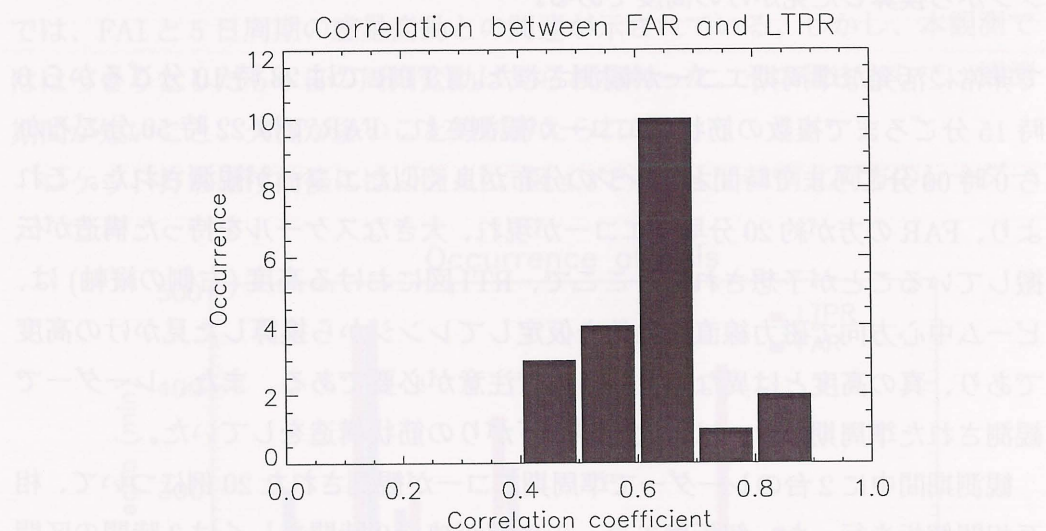


図 4.4: FAR と LTPR で観測された準周期エコーの時間をラグとしたときの相関値

いと考えられる。図 4.6は両レーダーで観測されたエコーのSN比が最大となる高度の差を示しており、FARの方が平均で約 4.9 km 低い高度に出現することが分かった。しかし、信楽におけるMUレーダーとLTPRの同時観測の結果では、図 4.7に示すようなエコーの発生高度に大きな差は見られていない。LTPR

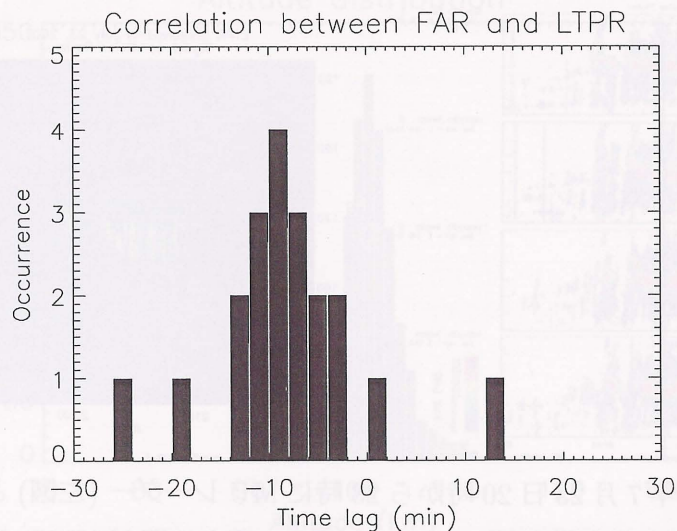


図 4.5: FAR と LTPR で観測された準周期エコーの相互相関解析におけるタイムラグ。正の値は LTPR において先にエコーが観測されることを示している。

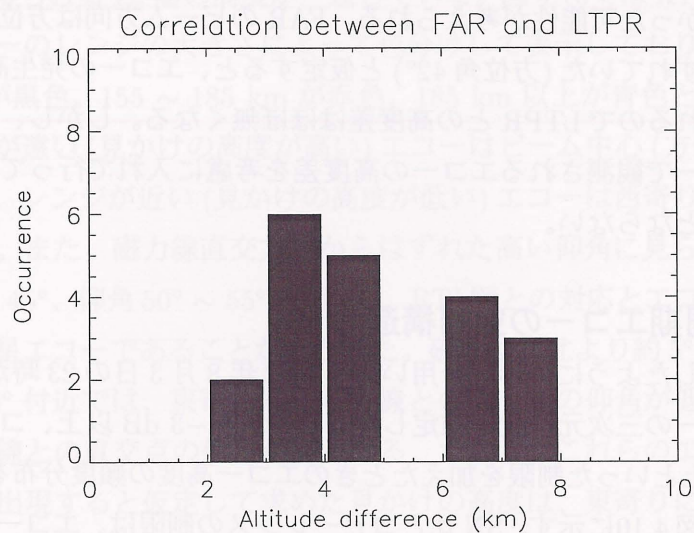


図 4.6: FAR と LTPR で観測された準周期エコーの SNR が最大となる高度の差。正の値は LTPR の方が高い高度に現れることを示している。

は干渉計を用いてエコーの位置を決定しており、アンテナの方位角がずれるとエコーの全体的な分布のつじつまが合わなくなる。また、4.2 で示す解析結果から LTPR の干渉計観測で決定された E_s 層の高度とロケット観測で得られた E_s 層の高度が一致することが分かった。LTPR のアンテナアレイは正しく配置さ

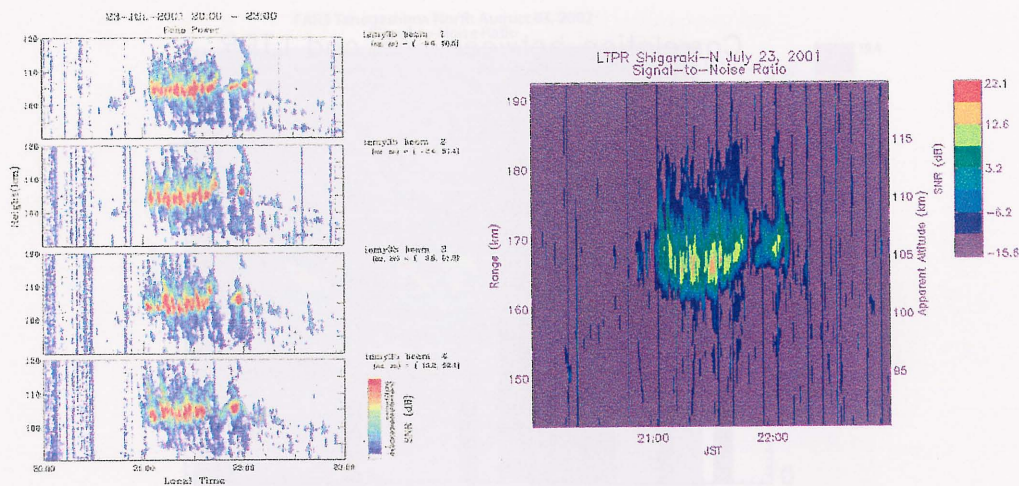


図 4.7: 2001 年 7 月 23 日 20 時から 23 時に MU レーダー (左図) と LTPR (右図) で同時に観測された準周期エコー。左図の一番上の図が LTPR とほぼ同じ方向にビームが向けられている。

れていることが分かる。これより、FAR のアンテナアレイの向きが正しく配置されていなかった可能性が考えられる。FAR のビーム方向は方位角 45° であるが、 3° 西へずれていた (方位角 42°) と仮定すると、エコーの発生高度は約 5 km 高く計算されるので LTPR との高度差はほぼ無くなる。しかし、相互相関解析は両レーダーで観測されるエコーの高度差を考慮に入れて行っているため、ここでは問題とならない。

4.2 準周期エコーの空間構造

3.2.2 で示したように干渉計を用いて、2002 年 8 月 3 日の 23 時から 24 時において、エコーの三次元位置を推定した。SN 比が -3 dB 以上、コヒーレンスの値が 0.7 以上といった制限を加えたときのエコー高度の頻度分布を図 4.8 に、到来角分布を図 4.10 に示す。SN 比とコヒーレンスの制限は、エコーの位置の決定精度を保つために設けた。図 4.8 は高度を 1 km 間隔に分け、各高度範囲内におけるエコーの数を集計したものである。これより、エコーは主に高度 95 ~ 105 km 付近に集中しており、分布の中心高度は 102 km である。RTI 図 (図 4.2) 上で見られるような高度 140 km に達するようなものは無いことが分かった。また、高度 80 ~ 90 km 付近に見られるエコーは流星エコーであると考えられる。図 4.9 はロケット観測によって得られた電子密度の高度分布を示しており、高度

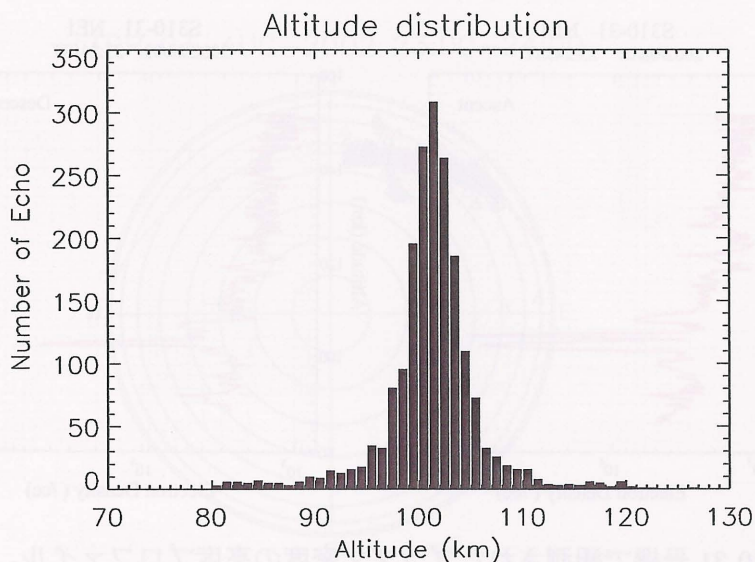


図 4.8: 2002 年 8 月 3 日 23 時から 24 時におけるエコーの高度分布

102 km に最も強い E_s 層が観測された。図 4.8、図 4.9よりレーダー観測とロケット観測で得られる E_s 層の高度が一致している。図 4.10では RTI 図 (図 4.2) におけるエコーのレンジの大きさによって色分けして表示しており、レンジが 155 km 以下が黒色、155 ~ 185 km が赤色、185 km 以上が青色とした。その結果、レンジが遠い (見かけの高度が高い) エコーはビーム中心 (方位角 30°) 方向より東寄り、レンジが近い (見かけの高度が低い) エコーは西寄りに現れることが分かった。また、磁力線直交方向からはずれた高い仰角に見られるエコー (方位角 $30^\circ \sim 45^\circ$ 、仰角 $50^\circ \sim 55^\circ$ 付近) は、RTI 図との対応とエコー強度の時間変化から流星エコーであることが分かった。磁北は真北より約 5° 西寄りであり、方位角 30° 付近では、東寄りほど磁力線との直交点の仰角が低く、逆に西寄りほど磁力線との直交点の仰角が高くなる。つまり、これらのエコーがビーム中心方向に出現すると仮定して求めた見かけの高度は、東寄りに発生したエコーほど高く、西寄りのものほど低くなる。また、RTI 図上では多くの例においてレンジ 155 km と 185 km 付近でエコー強度が弱い。図 3.5 に示した放射ビームパターンと図 4.10に示したエコーの到来角分布を比較した結果、レンジの色分けが変わる場所が放射ビームパターンのヌルに対応していることが分かった。つまり、エコー強度が弱い 2つのレンジは、対応する磁力線直交方向がちょうどメインローブとサイドローブの間に位置したために生じたものと考えられる。

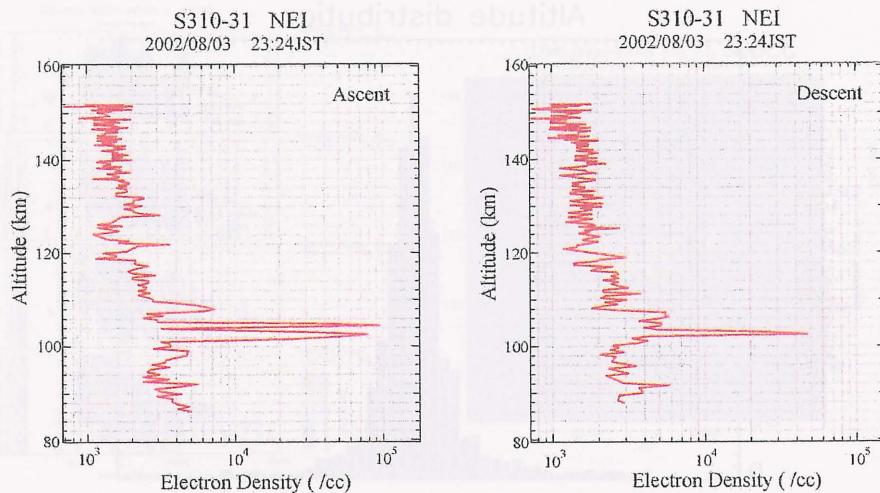


図 4.9: S-310-31 号機で観測されたプラズマ密度の高度プロファイル。左図がロケット上昇時、右図が下降時を表す。(小野、私信)

実際に、図 4.11 の白線で示した QP エコーの筋状構造 (trace1) を例にとり、その空間的な移動を調べた。図 4.12 の左図に鉛直断面で見たエコーの移動を、右図に水平断面で見たエコーの移動を示す。その結果、RTI 図 (図 4.11) 上では高度が約 110 km から 95 km まで変化しているように見えるが、干渉計観測により求めた真の高度は約 100 km で変化せずに約 60 m s^{-1} の速度で南西方向に移動することが分かった。同様に、図 4.11 において連なって見える筋状のエコー (trace2) の空間的な移動を追跡したものを図 4.13 に示す。図より、完全に一つのつながりではなく、いくつかの小さなかたまりがレーダーの視野を横切っていく様子が分かる。この結果は *Hysell and Burcham* [31] により示された FAI の構造と合致している。

さらに、図 4.14 に示すように筋状構造の傾きが右下がりから右上がりに変化するようなエコーについて、その空間的な移動を調べた。その結果、右下がりの筋 (trace3) は図 4.15 に示すようにエコー領域が東から西へ、右上がりの筋 (trace4) は図 4.16 に示すようにエコー領域が西から東へ移動することが分かった。以上の結果をまとめた RTI 図の解釈を図 4.17 に示す。RTI 図上で見かけの高い高度に見られるエコーはビームパターンの東側サイドローブに位置する遠くにある低い仰角のエコーであり、エコー領域がビームパターンを横切って西へ水平移動することにより右下がりの筋が作られる。ビームパターンのヌルに位置する

LTPR 03-AUG-2002 23:00-24:00

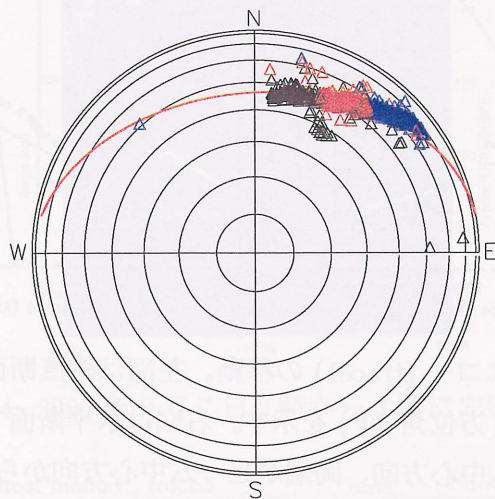


図 4.10: 2002 年 8 月 3 日 23 時から 24 時におけるエコーの到来角分布。表示方法は図 3.5 と同じ。エコーのレンジにより色分けを行った。(黒 : 155 km 以下、赤 : 155 ~ 185 km、青 : 185 km 以上)

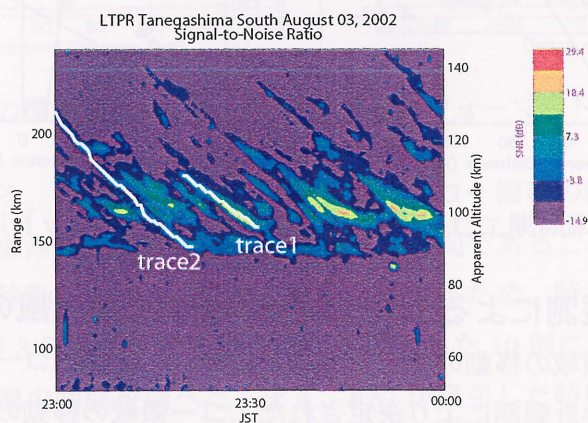


図 4.11: 2002 年 8 月 3 日 23 時から 24 時におけるエコー強度

場所でエコー領域が途切れて見え、さらに西へ水平移動することにより、ビームパターンの西側サイドローブに位置する近くにある高い仰角のエコーが見かけの低い高度に見られることが分かった。

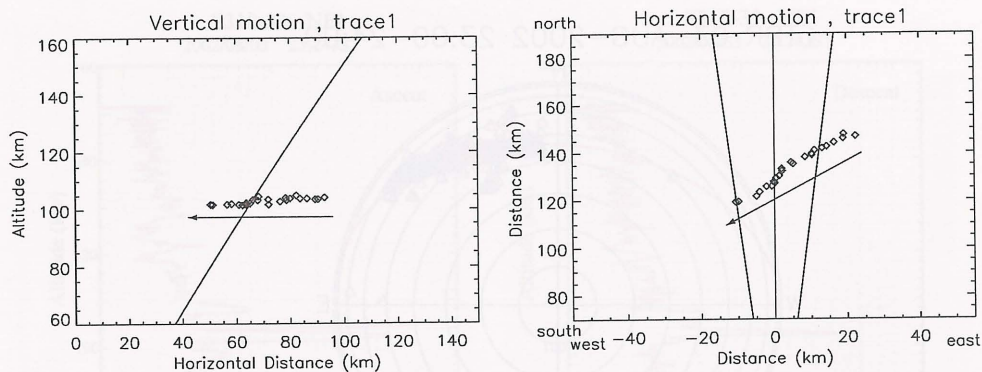


図 4.12: 図 4.8 の準周期エコー (trace1) の移動。左図は鉛直断面であり、図中の直線はビーム中心方向 (方位角 30°) を示す。右図は水平断面であり、図中の 3 本の直線は中心がビーム中心方向、両端がビーム中心方向から $\pm 5^\circ$ 離れた位置を示す。

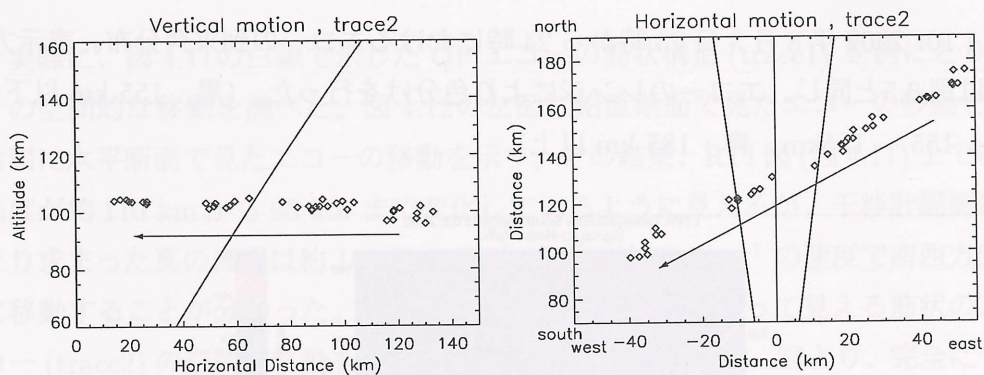


図 4.13: 図 4.8 の準周期エコー (trace2) の移動。フォーマットは図 4.12 と同じ。

4.3 干渉計観測によるエコー領域の移動と中性風の関係

次に、エコー領域の移動の原因を調べるために、流星エコーから推定される中性風と空間干渉計観測により決定されたエコー領域の移動の関係について調査した。図 4.14 の右下がりのエコー、右上がりのエコーを含む 1 時間毎の区間において得られた流星エコーから、高度分解能 6 km で導出した中性風をそれぞれ図 4.18、図 4.19 に示す。左右の図はそれぞれ東向きと北向きを正とする風速のプロファイルである。2 時から 3 時にかけて高度 100 km 付近の風速が強い南東向きから弱い北西向きに変化しており、エコーの傾きが変化するとき風向きに逆転が見られる。これより、中性風がエコー領域の移動に関係している

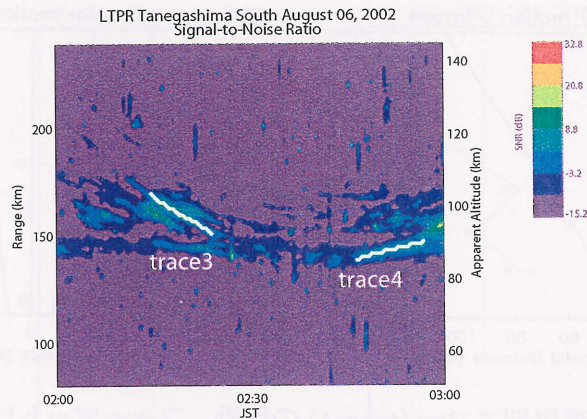


図 4.14: 2002 年 8 月 7 日 2 時から 3 時におけるエコー強度

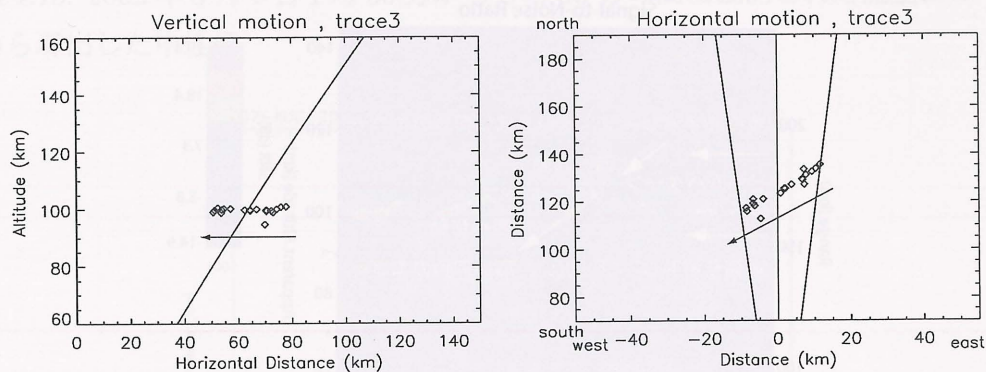


図 4.15: 図 4.11 の準周期エコー (trace3) の移動。フォーマットは図 4.12 と同じ。

ことが示唆される。しかし、ここでは南北風とエコー領域の移動方向には一致が見られるが、東西風とエコー領域の移動は逆方向であることが分かった。

エコー領域の移動と中性風の間係を詳しく調べるため、時系列が保存されている 2002 年 8 月 3 日から 8 日までの FAI が発生した 10 例について、エコー領域の移動と中性風の間係を調べた。まず、FAI が発生した時間範囲内に現れた一つの筋状構造の空間的な移動方向と速度、エコーの真の高度を干渉計から求めた。さらに、流星エコーから中性風を導出し、FAI が存在する高度付近の風向きとエコー領域の移動を比較した。 E_s 層が発生する高度 100 km 付近は風速シアの強いところであるが、中性風は高度分解能 3 km で求められており、エコーの真の高度と中性風の高度の差は最大でも 1.5 km しかない。このため、シアの影響によるエコーの存在する高度での風向きの誤差は小さいと考えられる。図 4.20 にエコー領域の移動と中性風の比較結果を示す。左図が両者の東西成分

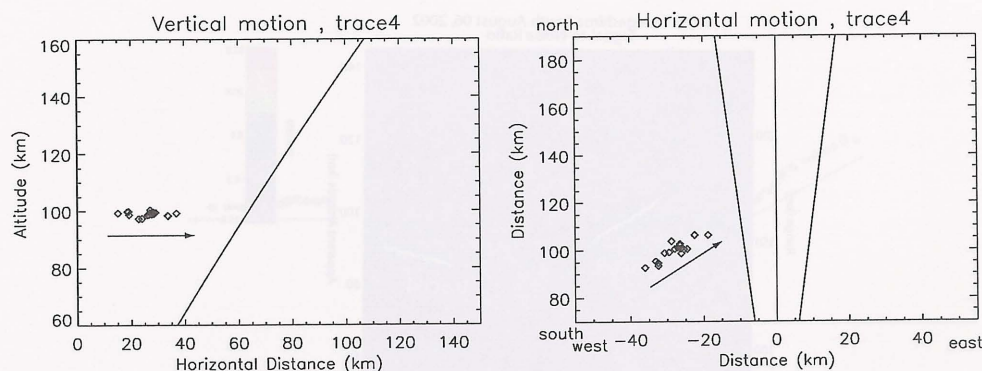


図 4.16: 図 4.11 の準周期エコー (trace4) の移動。フォーマットは図 4.12 と同じ。

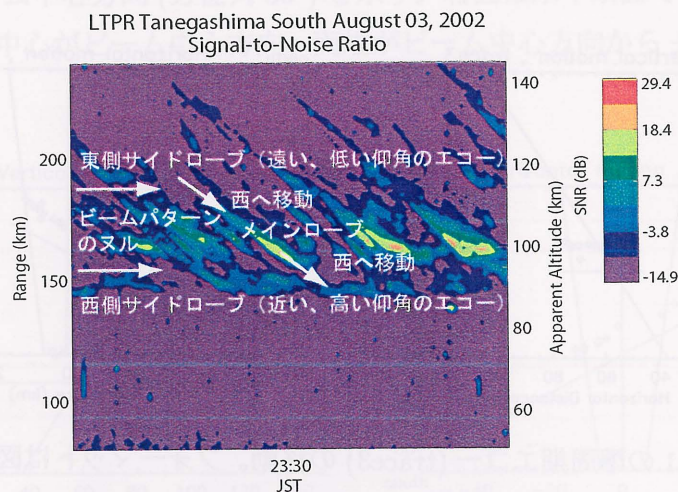


図 4.17: RTI 図の解釈

の比較、右図が南北成分の比較を示しており、それぞれ東向き、北向きが正の値を示す。図 4.20 より、前述した結果と同様に南北成分についてエコー領域の移動と中性風の風向きに正の相関が見られ、東西成分では逆相関が見られることが分かった。エコー領域の移動速度の東西成分 (図 4.20 の左図の水平軸の分布) が南北成分 (図 4.20 の右図の水平軸の分布) に比べて大きな値を持つが、これはレーダーの視野が東西に長く、南北に狭いためによるものである。また、エコー領域の移動方向と中性風の風向きの関係を調べたところ、表 4.1 に示すように (a)~(d) の 4 通りの組合せが見られた。

中性風によりエコー領域が移動すると仮定したときの移動例の概念図を図 4.21 に示す。エコー領域は細長く伸びている状態を仮定した。図 4.21 は水平面を真

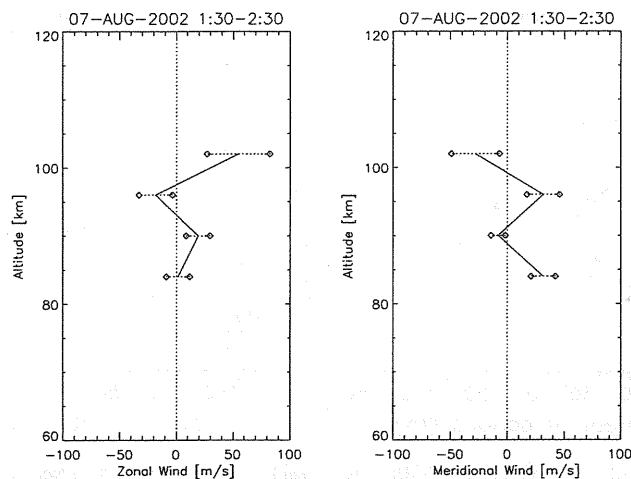


図 4.18: 2002 年 8 月 7 日 1 時 30 分から 2 時 30 分の間に観測された流星エコーから導出した中性風

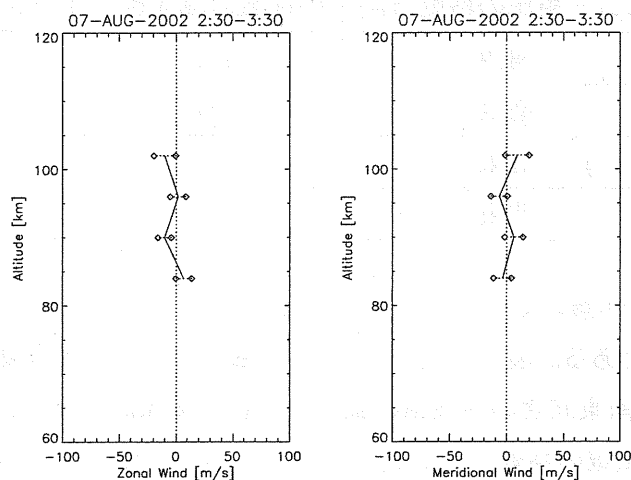


図 4.19: 2002 年 8 月 7 日 2 時 30 分から 3 時 30 分の間に観測された流星エコーから導出した中性風

上から見たもので、エコー領域が南東向きの中性風によって移動する様子を示している。図中の北東から南西に傾いた直線は、高度 100 km においてレーダーの視線が磁力線と直交する方向を示しており、FAI エコーはこの直線上で観測される。4.2 で示したように、FAI エコーは高度 100 km 付近を水平に移動する。しかし、レーダーの視野 (FAI に対して感度のある領域) は東西に長く、南北に狭い。このため、レーダー観測ではスリットカメラで FAI 領域の移動を見ているような状態となる。SEEK-2 における LTPR では、このスリットが東西方向

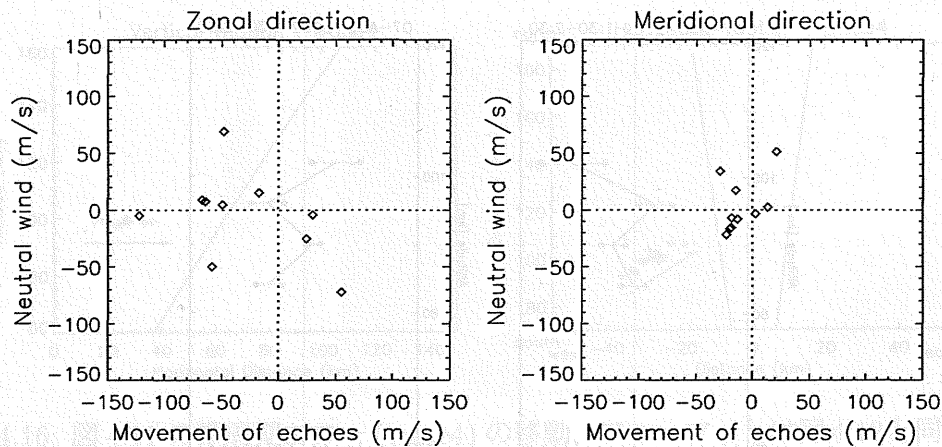


図 4.20: エコー領域の移動 (水平軸) と中性風 (垂直軸) の関係

表 4.1: エコー領域の移動方向と中性風の風向きの関係

	エコー領域の移動方向	中性風の風向き	イベント数
(a)	南西	南東	5
(b)	南西	北西	2
(c)	北東	南西	1
(d)	北東	北西	2

に対して $\theta_B (\cong 7^\circ)$ 傾いている。つまり、LTPR で見ているエコー領域の移動は見かけ上の移動である。図 4.21 の (1) ~ (5) は磁力線直交方向の傾き θ_B 、エコー領域の傾き θ_E 、南東向きの中性風の風向き θ_W の関係によって、レーダーで観測されるエコー領域の移動方向が異なる全ての事例を示している。レーダーで観測されるエコーの位置は細長く延びたエコー領域内の 1 点であり、図中に示した丸数字 1、2、3 の位置に順に観測される。(1)、(2) に示すようにエコー領域が北東から南西にかけて延びている場合はエコー領域の傾き θ_E と磁力線直交方向の傾き θ_B の関係によってレーダーで観測される移動方向が異なる。(1) に示すように $\theta_E > \theta_B$ の場合、レーダーではエコーが北東方向に移動するように観測される。これは、前述した風向きとエコー領域の移動が南北成分において正の相関を持つという結果と矛盾している。(2) に示すように $\theta_E < \theta_B$ の場合、レーダーではエコーが南西方向に移動するように観測される。一方、(3)、(4)、(5) に示すようにエコー領域が北西から南東にかけて延びている場合はエコー領域の傾き θ_E と中性風の風向き θ_W の関係によってレーダーで観測され

る移動方向が異なる。(3)に示すように $\theta_E = \theta_W$ の場合、実際にはエコーは移動しているが、レーダーでは移動していないように観測される。(4)に示すように $\theta_E > \theta_W$ の場合、レーダーではエコーが北東方向に移動するように観測される。(5)に示すように $\theta_E < \theta_W$ の場合、レーダーではエコーが南西方向に移動するように観測される。中性風の風向きが南東向き以外の場合も同様に説明できる。以上のことから、エコー領域の移動方向と中性風の風向きに両者の南北成分が必ずしも関係するわけでは無いことが分かった。

次に、表 4.1 に示したエコー領域の移動方向と中性風の風向きの関係から、図 4.21 で示したような細長く延びたエコー構造が存在し得る領域の推定を行った。図 4.22 に表 4.1 の (a) ~ (d) の組合せにおいて、エコー領域の波面が存在し得る領域を斜線で示す。その結果、観測結果の 7 割が (a)、(d) に示すようなエコー領域が北西から南東方向に傾いた範囲内に存在することが分かった。これより、SEEK-2 キャンペーンにおける観測結果はエコー領域が北西から南東に延びた構造が多いことが分かった。また、以上の結果からエコー領域が北西から南東に延びた構造が南西方向に移動している場合が多いために、この構造を東を向いたレーダーで見た場合に、右下がりの筋状構造が多く観測されたものと考えられる。

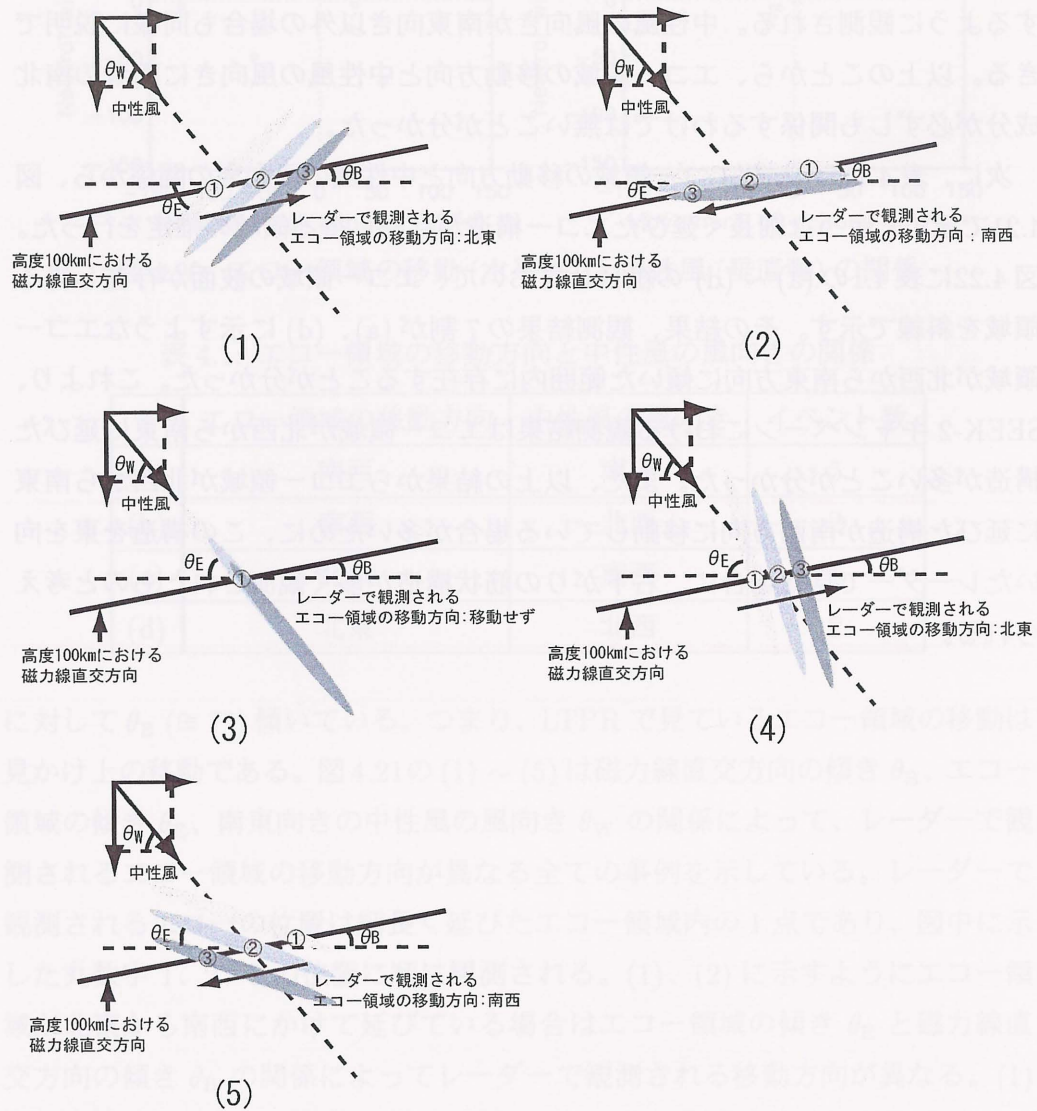


図 4.21: エコー領域が南東向き中性風により水平移動した時のレーダー視野内におけるエコー領域の移動

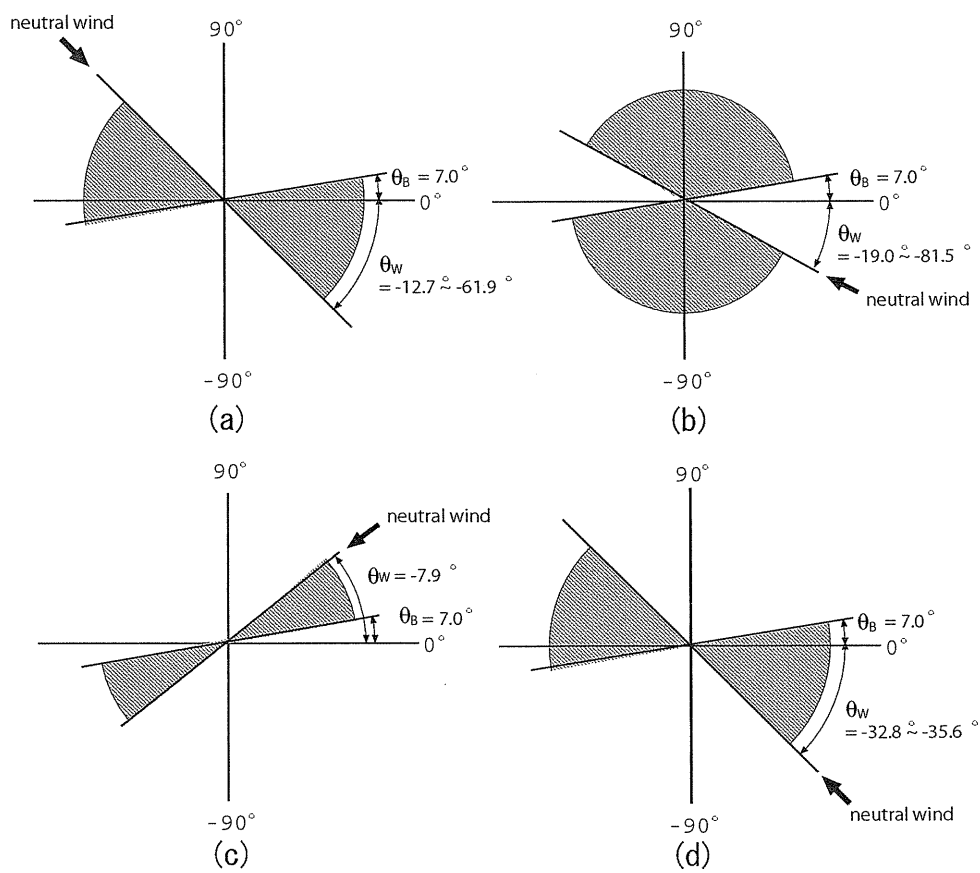


図 4.22: 表 4.1 (a) ~ (d) の場合において、エコー領域の波面が存在し得る領域

第5章 電離層内における電波屈折の影響

5.1 レーダー観測によるエコーの分布

FAI エコーは地球の磁力線に対する極めて高い直交性が知られている。MU レーダーの干渉計観測では、直交方向からはずれる角度が $0.05^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$ という報告がなされている [45]。しかし、図 4.10 からわかるように SEEK-2 のレーダー観測からは、磁力線直交方向から約 $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ はずれた位置に現れるエコーも多く観測された。本節では、エコーの磁力線直交方向に対する分布を調べるとともに、直交方向からはずれた方向から返ってくるエコーについて考察を行う。本節の解析では、1 回の観測で得られる 2560 点の時系列データを分割することで、分布を作成する際の標本数を増やした。この操作によりインコヒーレント積分回数が減り、位相の決定精度の低下に注意する必要がある。ここでは位相の誤差の影響を考慮して 2560 点の時系列データを $1/4$ に分割し、640 点で 1 つのデータとしている。2002 年 8 月 3 日 23 時から 24 時のビーム中心方向付近 (方位角 $29^{\circ} \sim 31^{\circ}$) のエコーについて、仰角と高度の関係とエコーの個数の頻度分布を調べた。その結果を図 5.1、図 5.2 に示す。ここでは、SN 比が 20 dB 以上のエコーを選択した。図 5.1 内の点線 (a) は方位角 29° における磁力線直交方向を示しており、点線 (b) は方位角 31° における磁力線直交方向を示す。エコーは 2 本の点線内付近に分布することが予想される。図 5.1 よりエコーの到来方向はほぼ磁力線直交方向であり、直交方向からはずれる角度は最大でも 1° 以下であることが分かった。また、同じデータに対して 0.5° の角度刻みで求めたエコーの仰角の頻度分布を図 5.2 に示す。図中の黒線は観測結果を、赤線は観測結果に対してガウスフィッティングを施したものを示している。黒線と赤線がほぼ一致することから、エコー仰角の分布はガウス分布をすることが分かった。また、ガウス分布の幅は 0.50° である。

同じ解析を SN 比が 10 dB 以上のエコーに対して行った結果を図 5.3、図 5.4 に示す。図 5.3 より、SN 比が 20 dB 以上のエコーを選択した場合と異なり、磁力線直交方向から約 2° はずれた方向から返ってくるエコーが存在することが分かった。また、観測される仰角が大きくなるほど高度が高くなるといった相関が見られることが分かった。ここで扱うデータは狭い方位角範囲を選択しているためにレンジがほぼ一定である。このため、仰角と高度に相関が見られるものと考えられる。さらに、図 5.4 よりエコーの分布はガウス分布よりも広がって

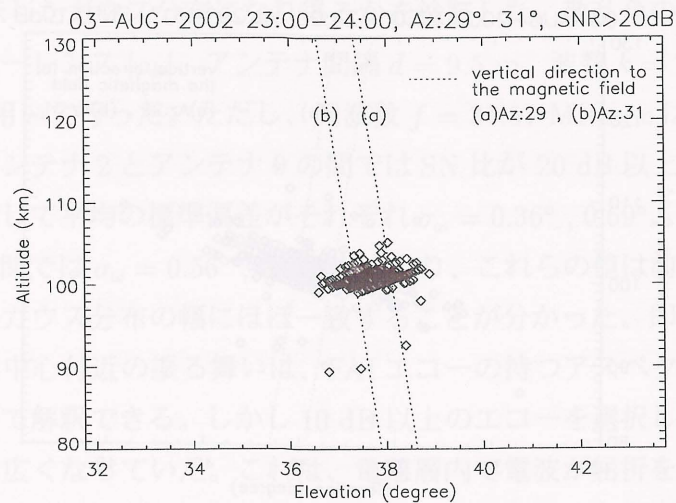


図 5.1: 2002 年 8 月 3 日 23 時から 24 時の方位角 $29^{\circ} \sim 31^{\circ}$ のエコーの仰角と高度の関係。SN 比が 20 dB 以上のものを選択。

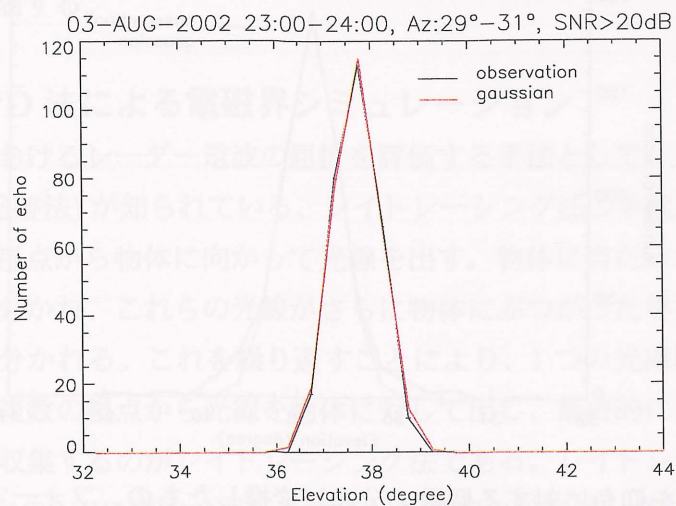


図 5.2: 図 5.1 を仰角に対する個数の分布に変換したもの。黒線は観測結果を、赤線は観測結果に対してガウスフィッティングを施したものを示す。

見える。フィッティングによって得られたガウス分布曲線の幅は 0.61° である。ここで仰角の決定誤差は、図 5.4 の各角度範囲内に横線で示すように極めて小さい。これより、観測結果の分布とガウス分布の差は有意であり、エコー仰角の分布は中心から約 $\pm 1^{\circ}$ の範囲においてはガウス分布に従うが、その外側ではガウス分布よりも大きい出現確率を持つことが分かった。さらに、磁力線直交方

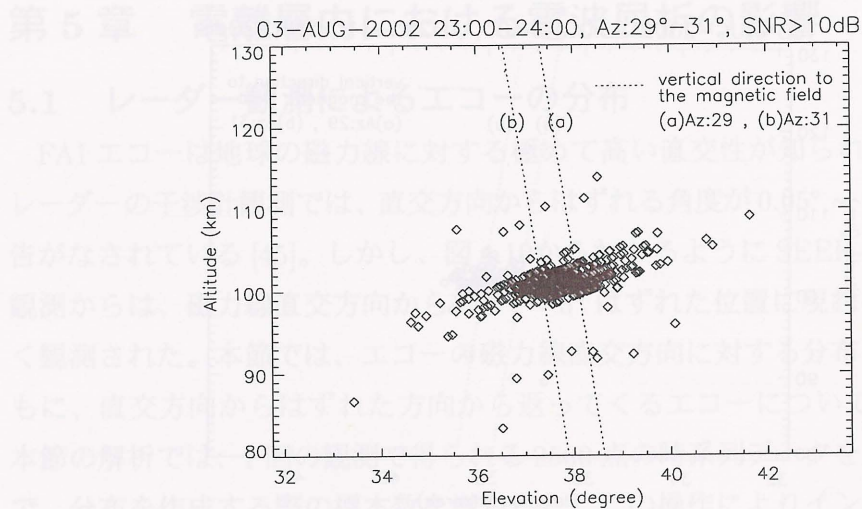


図 5.3: フォーマットは図 5.1と同じ。SN 比が 10 dB 以上のものを選択。

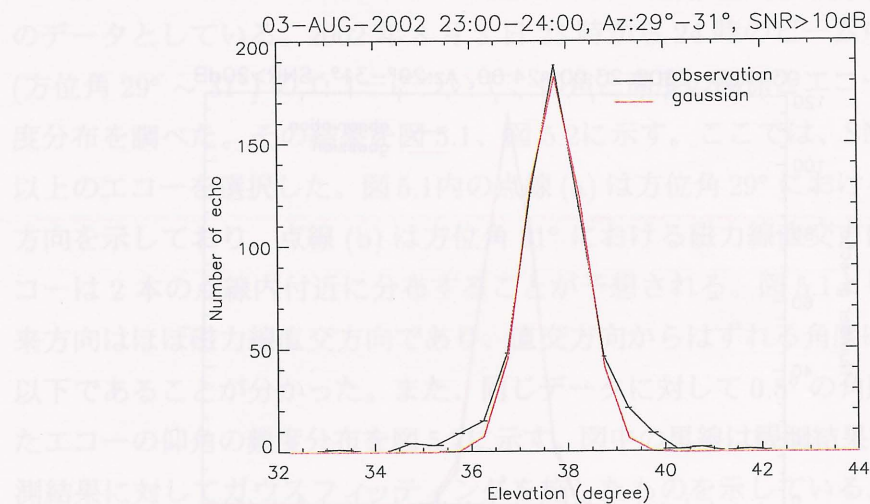


図 5.4: 図 5.3を仰角に対する個数の分布に変換したもの。フォーマットは図 5.2と同じ。

向から最大で 1.5° はずれた位置で観測結果のエコー仰角の分布とガウス分布の差が最大となることが分かった。

次に、干渉計観測により決定したエコーの三次元位置に対する散乱角を計算した。ここで求まる散乱角の角度範囲内であれば、磁力線直交方向からはずれた方向からもエコーが返って来ることを示す。エコーの分布中心に対する散乱角と上述のガウス分布の幅との比較を行うことにより、観測結果が図 5.2、図

5.4に赤線で示したガウス分布になり得るかを検証した。散乱角の計算は、アンテナ間のコヒーレンス $|\rho_\omega|$ 、アンテナ間隔 $d = 9.5 \text{ m}$ 、波数 $k = 2\pi f/c$ の値から式 (3.7) を用いて行った。ただし、周波数 $f = 31.57 \text{ MHz}$ 、 c は光速である。その結果、アンテナ 2 とアンテナ 9 の間では SN 比が 20 dB 以上、10 dB 以上のエコーに対して平均の標準偏差がそれぞれ $\sigma_\omega = 0.36^\circ, 0.69^\circ$ 、アンテナ 1 とアンテナ 9 の間では $\sigma_\omega = 0.56^\circ, 0.70^\circ$ と求まり、これらの値は前述の仰角分布にあてはめたガウス分布の幅にほぼ一致することが分かった。即ちエコーの仰角分布のうち中心付近の振る舞いは、FAI エコーの持つアスペクトセンシビティによって解釈できる。しかし 10 dB 以上のエコーを選択した場合に、仰角分布は更に広がっていた。これは、電離層内で電波が屈折を受けるために生じたものと考えられる。また、SN 比が低いものを含むエコーの分布のみがガウス分布をしないことから、屈折によってエコー強度が低下している可能性が考えられる。この結果を受けて、次節では電離層内における電波の屈折の影響を定量的に評価する。

5.2 FDTD 法による電磁界シミュレーション

電離層内におけるレーダー電波の屈折を評価する手法として、レイトレーシング法 (光線追跡法) が知られている。レイトレーシング法の手順を以下に説明する。まず、視点から物体に向かって光線を出す。物体に当たった光線は反射光と屈折光に分かれ、これらの光線がさらに物体にぶつかった場合は再び反射光と屈折光に分かれる。これを繰り返すことにより、1 つの光線は複数の光線に分岐する。複数の視点から光線を物体に対して出し、最終的に全ての光線に分岐の情報を収集するのがレイトレーシング法である。レイトレーシング法を用いて E_s 層内の VHF 電波の屈折を評価した過去の研究は、*Hysell et al.* [46] によって行われている。*Hysell et al.* は図 5.5 に示すように、球形のプラズマ塊が $N = N_0 \exp(-r^p/2\sigma^p)$ の式に従って中心から外側に向かって $\sigma = 0.5$ で密度が減少するモデルを仮定している。ただし、 N_0 はプラズマ密度の最大値、 r は中心からの距離である。このようなプラズマに対して周波数 f の電波が入射したとき、電波が屈折する最大の角度 ϕ は経験的に以下の式で表された。

$$\phi = 2 \left(\frac{30}{f} \right)^2 \frac{N_0}{10^6} (\log_2 p + 1) \quad (5.1)$$

ただし、 ϕ 、 f 、 N_0 の単位はそれぞれ度、MHz、 cm^{-3} である。式 (5.1) を用いて、2002 年 8 月 3 日 23 時から 24 時のレーダー観測における屈折角の計算を行った。プラズマ密度の最大値として、山川町におけるアイオノゾンドの観測値 $f_oE_s = 6.28$ MHz に対応するプラズマ密度の値 $N_0 = 4.93 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ を与えた。また、周波数を $f = 31.57$ MHz、プラズマ密度が減衰する勾配の指数を $p = 2$ とした。その結果、屈折を受ける最大の角度は $\phi = 1.78^\circ$ と求まり、前述の FAI エコーの仰角分布がガウス分布から最も離れる角度に近い値を示した。しかし、*Hysell et al.* では背景のプラズマ密度、地球の磁場の影響を考慮していない。そこで、本研究ではこれらを考慮に入れた FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method)[47] を用いた電磁界の計算機シミュレーションを開発して、より詳しい検討を行った。

電磁界の解析はアンテナ解析、電波の散乱解析等の各分野で行われており、その手法としてモーメント法や有限要素法が主に用いられてきた。しかし、近年では FDTD 法が電磁界解析の手法として注目されている。FDTD 法とは、マクスウェルの微分方程式を差分化し、解析空間の電磁界をリープフロッグアルゴリズムを用いて時間領域で解く方法である [47]。このため、過渡解あるいは周波数応答を直接求めることができる。FDTD 法を用いる利点として、モーメント法などの積分方程式に基礎をおく解析手法では適用が困難な問題を比較的簡単に解くことができる、アルゴリズムが簡単である、優れた精度を持つ、複雑な物質の解析や材料定数の異なる物質の解析が定数の変更のみで簡単に行え

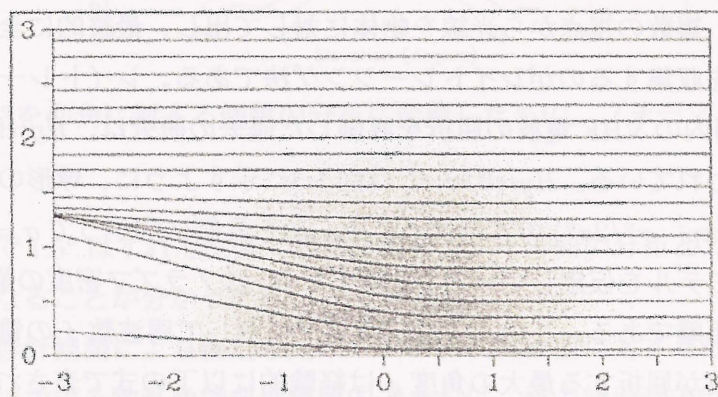


図 5.5: レイトレーシング法による電波の屈折のモデル図。Hysell et al.[46] による。

ることなどが挙げられる。また、レイトレーシング法に対する利点として、電力分布の評価が可能となることが挙げられる。

以下に、FDTD 法のアルゴリズムの基本概念と定式化について述べる。FDTD 法では波源や散乱体を囲むように解析領域をとり、解析領域全体を微小直方体(セル)に分割する。次に、全セルに対してマクスウェルの微分方程式

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (5.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) \quad (5.3)$$

を適用して定式化が行われる。マクスウェルの方程式を時間および空間について差分化する際には、中心差分が用いられる。このため、電界および磁界は時間、空間的に交互に配置されることになる。電界を $t = (n-1)\Delta t, n\Delta t, \dots$ の整数次の時刻に、磁界を $t = (n-1/2)\Delta t, (n+1/2)\Delta t, \dots$ の半奇数次の時刻に割り当てることにより、時間に関して電界は Δt だけ前の電界の値と $\Delta t/2$ だけ前の磁界の値を用いて表され、磁界は Δt だけ前の磁界の値と $\Delta t/2$ だけ前の電界の値を用いて表される。図 5.6 に 3 次元での単位セル内における空間的な電界、磁界の配置を示す。ただし、セルサイズは $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ とする。電界は各辺に沿って、磁界は面の中心に垂直に割り当てられる。電界の回転が磁界を、磁界の回転が電界を作るマクスウェルの方程式を満たす配置となっている。FDTD 法は閉領域の解析手法であるため、開放領域の問題を扱う場合には解析領域の外壁に反射が起こらないような仮想的な境界(吸収境界)を設ける必要がある。さらに計算上の注意として、差分が基本となる FDTD 法ではセルサイズが細かいほど精度が高くなるが、その分計算に必要なメモリ数が増大することが挙げられる。セルサイズは、ナイキストのサンプリング定理より、取り扱う電磁波の波長の $1/2$ 以下でなければならない。また、時間ステップ Δt は、Courant の安定条件により

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{(\frac{1}{\Delta x})^2 + (\frac{1}{\Delta y})^2 + (\frac{1}{\Delta z})^2}} \quad (5.4)$$

としなければならない。図 5.7 に FDTD 法によるシミュレーションの計算順序を記述する。

本研究で対象とする物体は誘電率が異方性を示す磁化プラズマである。外部静電界が印加された磁化プラズマの比誘電率 $\bar{\epsilon}_r$ には非対角要素が現れ、分散性

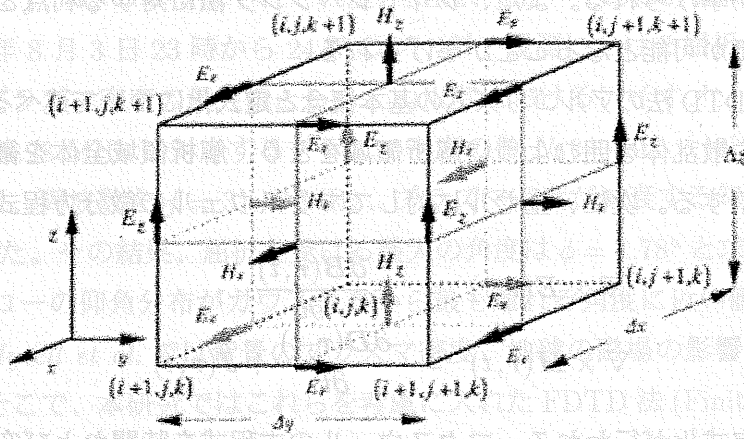


図 5.6: 3次元単位セル内における電磁界の配置 [47]

を示すため

$$\overline{\overline{\epsilon}}_{\mathbf{r}} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx}(\omega) & -j\epsilon_{xy}(\omega) & 0 \\ j\epsilon_{yx}(\omega) & \epsilon_{yy}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz}(\omega) \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

$$\epsilon_{xx}(\omega) = \epsilon_{yy}(\omega) = 1 - \frac{(\frac{\omega_p}{\omega})^2 (1 - \frac{j\nu_c}{\omega})}{(1 - \frac{j\nu_c}{\omega})^2 - (\frac{\omega_c}{\omega})^2} \quad (5.6)$$

$$\epsilon_{zz}(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu_c - \omega)} \quad (5.7)$$

$$\epsilon_{xy}(\omega) = \epsilon_{yx}(\omega) = \frac{(\frac{\omega_p}{\omega})^2 \frac{\omega_c}{\omega}}{(1 - \frac{j\nu_c}{\omega})^2 - (\frac{\omega_c}{\omega})^2} \quad (5.8)$$

と表現される。ただし、 ω_p はプラズマ角周波数、 ω_c は外部磁場に比例するサイクロトン角周波数、 ν_c は損失を表す衝突周波数である。本研究では、外部磁場を 4.6×10^{-5} T として $\omega_c = 8.1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 、 $\nu_c = 1.0 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ とした [1]。電束密度 $\mathbf{D}$ と電界 $\mathbf{E}$ 、磁束密度 $\mathbf{B}$ と磁界 $\mathbf{H}$ の関係は

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \overline{\overline{\epsilon}}_{\mathbf{r}} \mathbf{E} \quad (5.9)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (5.10)$$

と表される。ただし、 ϵ_0 、 μ_0 はそれぞれ真空の誘電率、透磁率である。本シミュレーションでは式 (5.9)、(5.10) を用いて式 (5.2)、(5.3) を時間、空間的に差分化することで定式化を行った。解析領域の境界では、最も一般的な Mur の一次

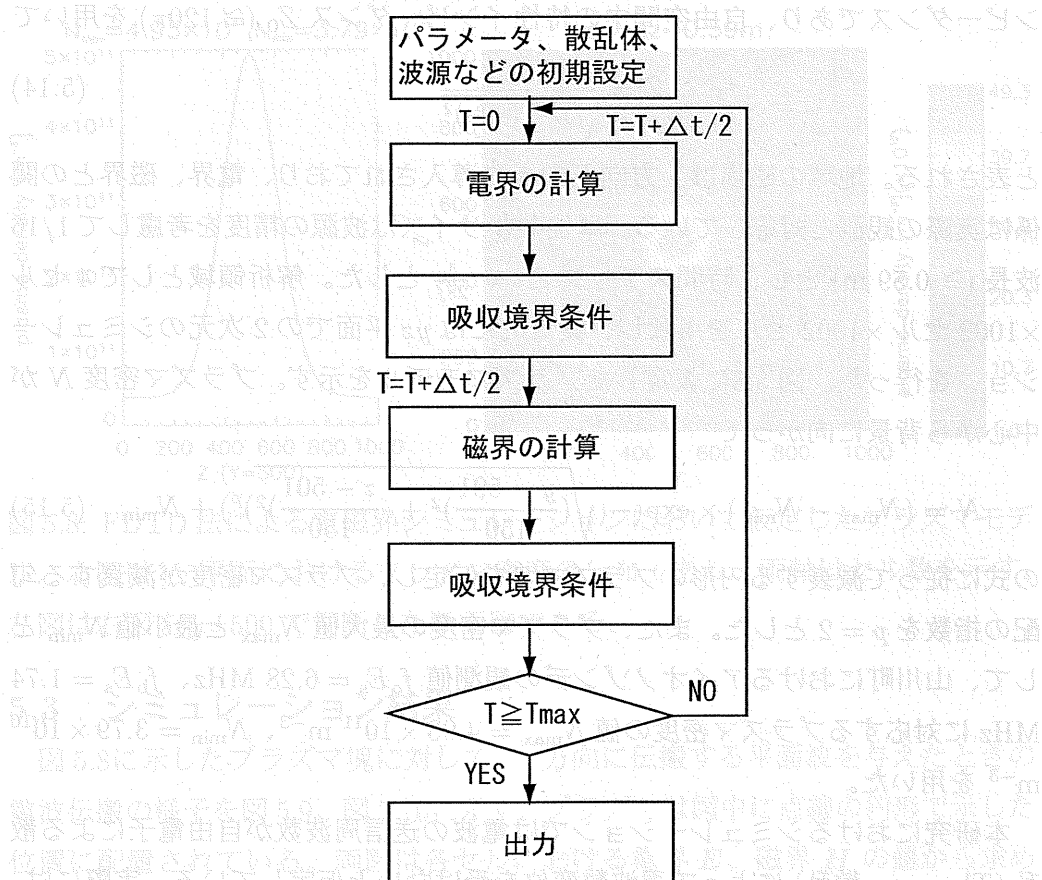


図 5.7: FDTD 法の計算フローチャート

の吸収境界条件を採用して、境界面に垂直に入射する波が反射を起こさないような処理を行った。また、波源として

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 - \cos \frac{\pi t}{T_w}) \sin \omega_0 t & (0 \leq t \leq T_w) \\ \sin \omega_0 t & (t \geq T_w) \end{cases} \quad (5.11)$$

$$E_x = p(t - \frac{\Delta t}{2}) \quad (5.12)$$

$$H_z = \frac{E_x}{Z} \quad (5.13)$$

で表されるような振幅が時間 T_w の間に滑らかに大きくなるような正弦波を電界の x 方向成分、磁界の z 方向成分として与え、 y 方向に伝搬する波を入射した。ただし、 $\omega_0 = 2\pi f$ 、 $f = 31.57$ MHz、 $T_w = 4/f$ である。 Z は媒質の特性イ

ンピーダンスであり、自由空間中の特性インピーダンス Z_0 ($\cong 120\pi$) を用いて

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\frac{\omega_p}{2\pi f})^2}} \quad (5.14)$$

と表される。地球の磁場は z 方向下向きに導入されており、電界、磁界との関係は実際の観測と対応している。単位セルサイズは波源の精度を考慮して $1/16$ 波長 ($\cong 0.59$ m) とし、時間ステップ $\Delta t = \frac{1}{28f}$ とした。解析領域として 4 セル $\times 1002$ セル $\times 1002$ セルを用意し、実質的には yz 平面での 2 次元のシミュレーションを行った。図 5.8 に仮定したプラズマモデルを示す。プラズマ密度 N が中心から背景に向かって

$$N = (N_{\max} - N_{\min}) \times \exp(-(\sqrt{(\frac{y-501}{150})^2 + (\frac{z-501}{150})^2})^p) + N_{\min} \quad (5.15)$$

の式に従って減衰する円形のプラズマ塊を仮定し、プラズマ密度が減衰する勾配の指数を $p = 2$ とした。また、プラズマ密度の最大値 $N_{\max}$ と最小値 $N_{\min}$ として、山川町におけるアイオノゾンの観測値 $f_oE_s = 6.28$ MHz、 $f_bE_s = 1.74$ MHz に対応するプラズマ密度の値 $N_{\max} = 4.93 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 、 $N_{\min} = 3.79 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ を用いた。

本研究におけるシミュレーションでは電波の送信周波数が自由電子による散乱 (Thomson 散乱) によって周波数変位を受けないと仮定している。実際には、入射波の波長に対してプラズマのデバイ長が十分小さいとき、イオン音波の速度とラングミュア波の速度に対応する周波数変位を受ける [48, 49]。変位の大きさはイオン音波に対しては数 kHz であるが、ラングミュア波に対しては数 MHz のプラズマ周波数に近い値をとる。しかし、自由電子 1 個の散乱断面積が $6.7 \times 10^{-29} \text{ m}^2$ と極めて小さいため、Thomson 散乱は電磁波のエネルギー全体の $1/10^{17}$ 程度しか影響しない。このため、Thomson 散乱による影響は無視してもよい。また、FDTD 法では個々のプラズマ粒子の動的な変化や非線形な運動の影響を考慮に入れていない。異方性プラズマ領域においてこれらの影響を考慮に入れたプラズマ粒子シミュレーションと full-wave 解析の比較が *Yagitani et al.* [50] によってなされている。その結果、本シミュレーションに近いコールドプラズマの条件下では、両方法の結果に良い一致が見られた。これより、本研究においてプラズマ粒子の動的な変化や非線形な運動の影響を無視しても問題はない。さらに簡単のため、本シミュレーションでは FAI による電磁波の散乱の影響は無視している。

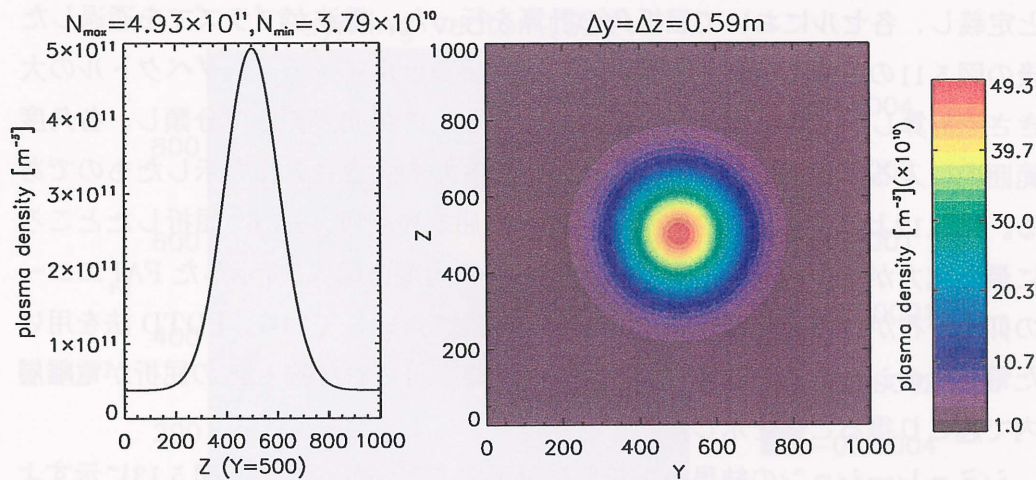


図 5.8: FDTD 法による電磁界シミュレーションにおいて仮定したプラズマモデル。右図は yz 平面におけるプラズマ密度の分布であり、両軸はセル数を示す。左図は右図を $y=500$ で切断した断面図である。

5.3 シミュレーション結果

図 5.8 に示したプラズマ塊に対して、 y 方向に伝搬する平面波を与えたときの電波伝搬の様子を図 5.9、図 5.10 に示す。プラズマは図中に点線の円形で示した位置に配置されている。両図は各セルにおける電界 $\mathbf{E}$ 、磁界 $\mathbf{H}$ の値から求めたポインティングベクトル $\mathbf{S} (= \mathbf{E} \times \mathbf{H})$ の分布を示しており、図 5.9、図 5.10 はそれぞれ $\mathbf{S}$ の y 方向成分 S_y 、 z 方向成分 S_z を示している。ポインティングベクトルの計算は 1 周期分を平均して行われた。ポインティングベクトルは電力密度の次元を持つため、両図は電力の分布とその流れを示す。図 5.9、図 5.10 よりプラズマ通過前は一樣であった電力の分布がプラズマを通過することで変化を受ける。図 5.9 より、電波の進行方向 (y 方向) では、プラズマ通過後に中心付近 ($z = 400 \sim 600$) で電力が弱まり、両端 ($z = 200 \sim 400$ 、 $600 \sim 800$) 付近で電力が強まる。一方、電波の進行方向に垂直な方向 (z 方向) では、図 5.10 よりプラズマ通過後の上半分 ($z \geq 500$) では正の成分を持ち、下半分 ($z \leq 500$) では負の成分を持つことが分かった。以上の結果は、電波がプラズマを通過することで屈折を受け、広がって伝搬してゆく様子を示している。そこで、電波の屈折角 θ_r を S_y 、 S_z の値を用いて

$$\theta_r = \tan^{-1}\left(\frac{S_z}{S_y}\right) \quad (5.16)$$

と定義し、各セルにおいて屈折角の計算を行った。電波がプラズマを通過した後の図 5.11 の太線に示した線上において屈折角とポインティングベクトルの大きさを計算した。図 5.12 は求めた屈折角を 0.1° の角度刻みで分類し、各角度範囲内に入るセルでのポインティングベクトルの大きさの和を示したものである。図 5.12 よりプラズマを通過した電波は屈折を受け、 $\pm 1.6^\circ$ 屈折したところに最も電力が集中することが分かった。この角度は図 5.4 で示した FAI エコーの仰角分布がガウス分布から最も離れる角度に対応しており、FDTD 法を用いた電磁界のシミュレーションにより観測結果で得られた約 1.5° の屈折が電離層内で起こり得ることを示した。

シミュレーションの結果から新たに以下のことが分かった。図 5.13 に示すように、屈折はプラズマ密度の最大値と最小値の差に比例することが分かった。また、図 5.14 の実線に示すように屈折はプラズマ密度が減衰する勾配の指数 p に依存し、電波の屈折はプラズマ塊の大きさには依存しないことが分かった。さらに、式 (5.5) におけるプラズマの異方性を示す誘電率の非対角成分 $\epsilon_{xy}(\omega)$ は、本研究の範囲においては対角成分 $\epsilon_{xx}(\omega)$ 、 $\epsilon_{zz}(\omega)$ に比べて極めて小さく、電波の屈折における地球の磁場の影響はほぼ無視できることが分かった。

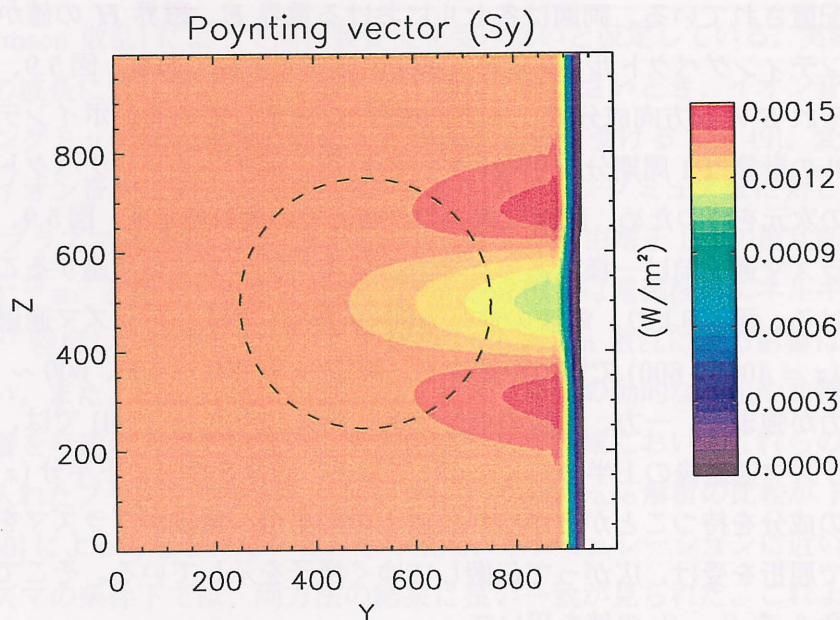


図 5.9: ポインティングベクトルの y 方向成分の分布

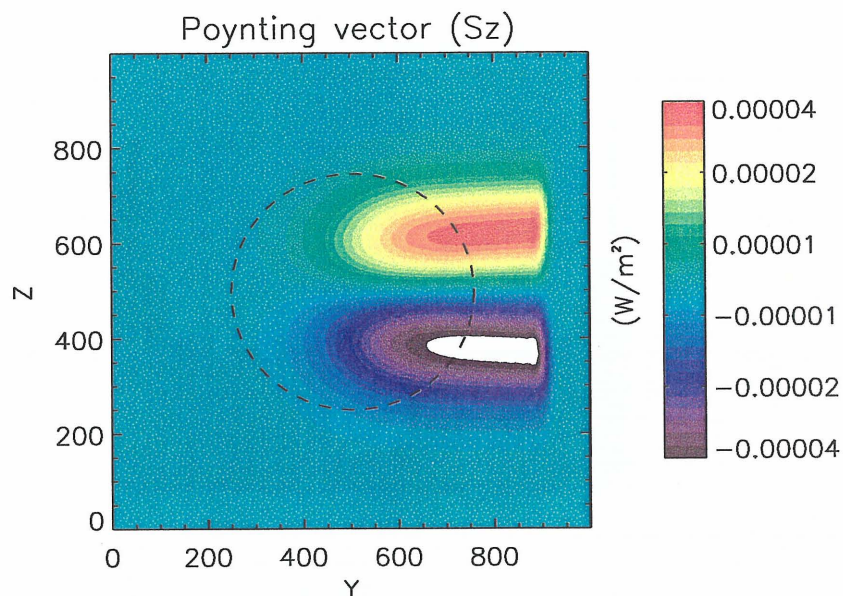


図 5.10: ポインティングベクトルの z 方向成分の分布

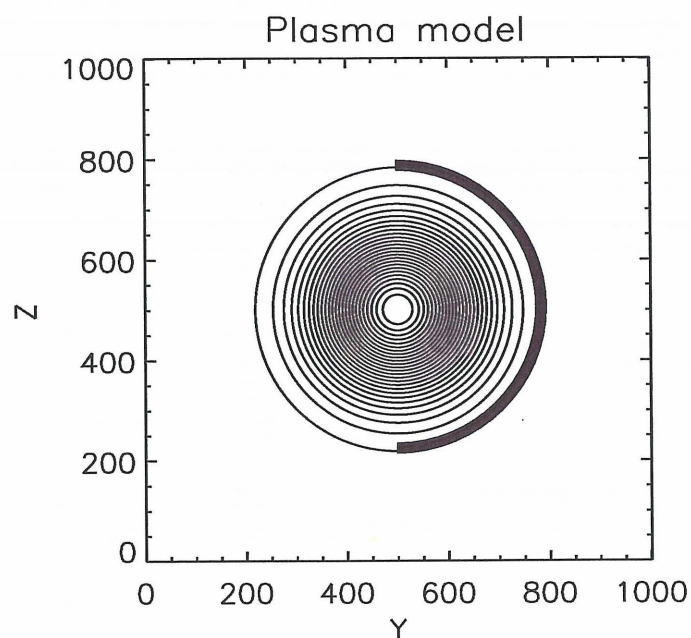


図 5.11: 屈折角の評価。図中の太線で示した断面において屈折角を計算。

5.4 E_s 層の不uniform性

FAI は E_s 層に不uniformが生じるときに発生することが知られている [51]。電波は不uniformが濃いところに当たると屈折を受け、当たらない場合はそのまま突き抜けて伝搬する。本節では、図 5.4 に示したレーダー観測結果と図 5.12 に示

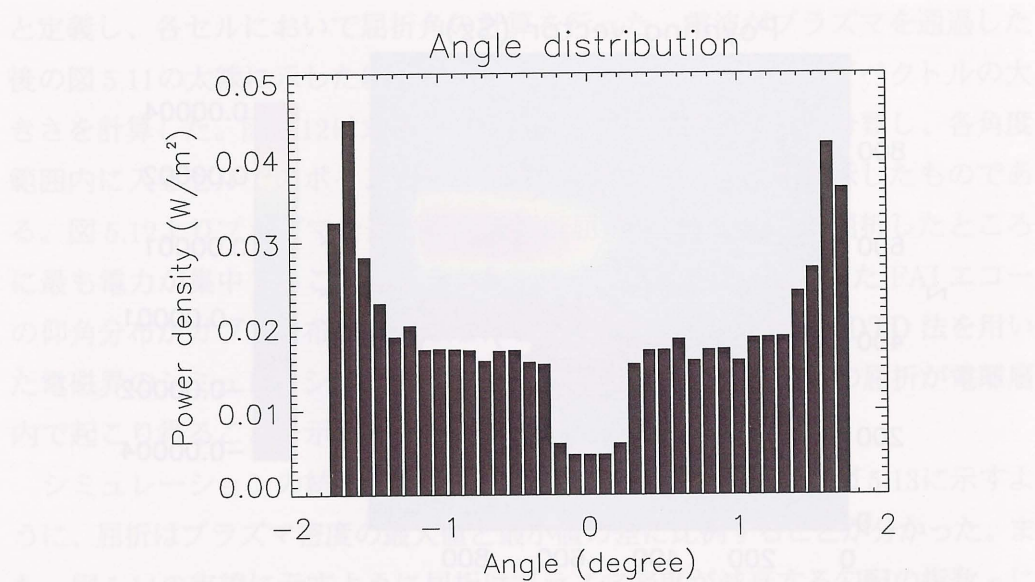


図 5.12: 図 5.12 の太線上における屈折角に対する電力密度の分布

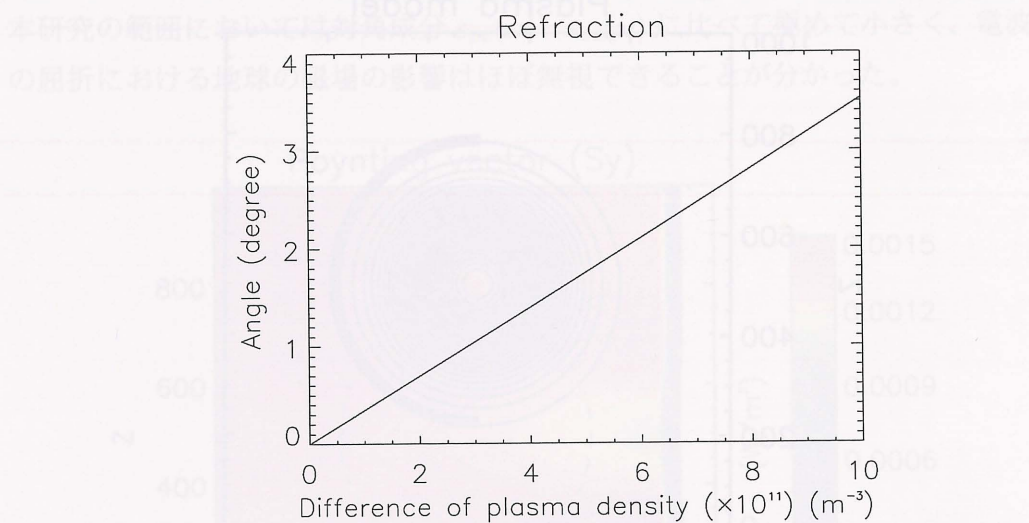


図 5.13: プラズマ密度の最大値と最小値の差に対する屈折角の分布

した計算機シミュレーションの結果から、プラズマ塊の分布の割合を推定する。図 5.15 に、シミュレーションの結果から観測で得られる分布を推定した結果を示す。図中の黒と赤の実線は図 5.4 と同様の分布である。点線は FDTD 法により得られた図 5.12 のエネルギー分布である。レーダー電波が屈折を受けた後に FAI によって反射されるとき、その仰角分布は赤線で示すガウス分布と

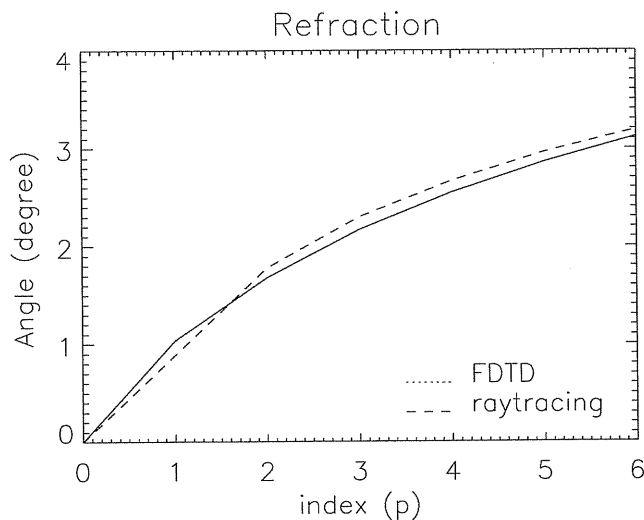


図 5.14: FDTD 法を用いた計算機シミュレーションから求めたプラズマ密度勾配の指数 p に対する屈折角の分布 (実線) とレイトラシング法による経験式 (5.1) から計算した屈折角の分布 (点線)。ただし、プラズマ密度の最大値、最小値をそれぞれ $N_{\max} = 4.93 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 、 $N_{\min} = 3.79 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ とした。

点線で示すエネルギー分布の畳み込み積で求められることになり、図中の緑線の分布となる。観測された仰角分布は屈折の影響下の分布 (緑線) とガウス分布 (赤線) の和となる。屈折の影響による分布 (緑線) とガウス分布 (赤線) の比を 1:6 としたときの両者の和を青線で示す。このとき、青線は観測結果の分布 (黒線) に非常に近い分布をし得ることが分かった。この結果は全体の分布の 1/7 が屈折の影響を受けることを示している。

FDTD 法によるシミュレーションから、円形のプラズマ塊に対して電波が入射した場合、大きく 2 方向に広がって伝搬する様子が見られた。屈折により電磁波の電界が 1/2 に分けられると仮定すると、簡単には、入射と反射の往復で電界が 1/4 となり電力が 12 dB 減衰することが考えられる。図 5.16 の実線に、2002 年 8 月 3 日から 8 日の FAI が発生した時間帯におけるビーム中心方向付近 (方位角 $29^\circ \sim 31^\circ$) のエコーについて、SN 比に対するエコーの頻度分布を示す。ここには屈折の影響を受けたエコーと受けないエコーが混在している。図中の点線は、実線の分布を左へ 12 dB 分シフトした分布である。屈折の影響によってエコー強度が概ね 12 dB 低下したと仮定すると、点線は屈折の影響を受けたエコーの SN 比に対する頻度分布と考えてよい。図 5.16 よりこの部分のエ

コーの個数が総個数に対して約 1/7 であることが分かり、上述の結果と一致することが分かった。以上の結果から、2002 年 8 月 3 日の観測では、 E_s 層内において全体の 1/7 の確率で入射電波がプラズマの粗密に当たり屈折の影響を受けたものと考えられる。さらに図 5.8 に示した円形のプラズマ塊は、塊の約 1.8 倍の直径の範囲に含まれる背景プラズマを圧縮する事で作られ得ることが分かり、プラズマ塊の生成は容易に実現可能であると考えられる。

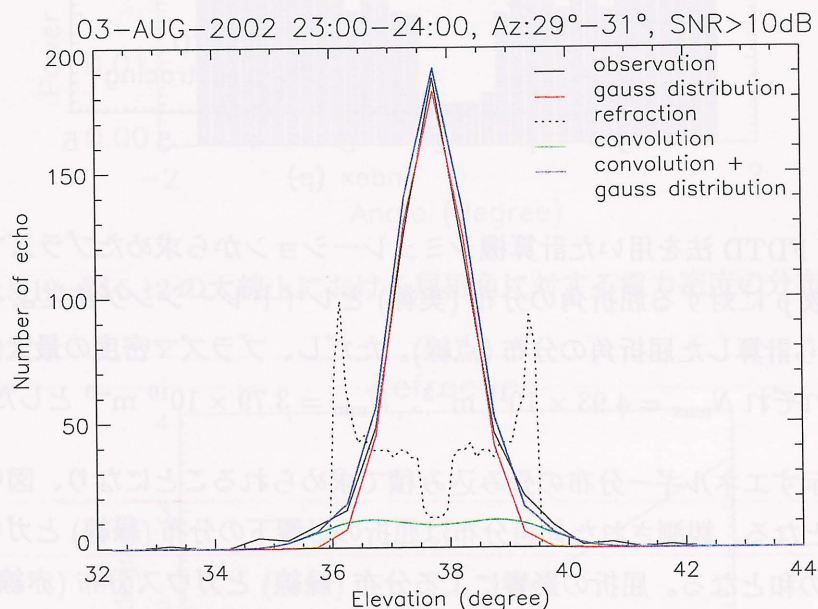
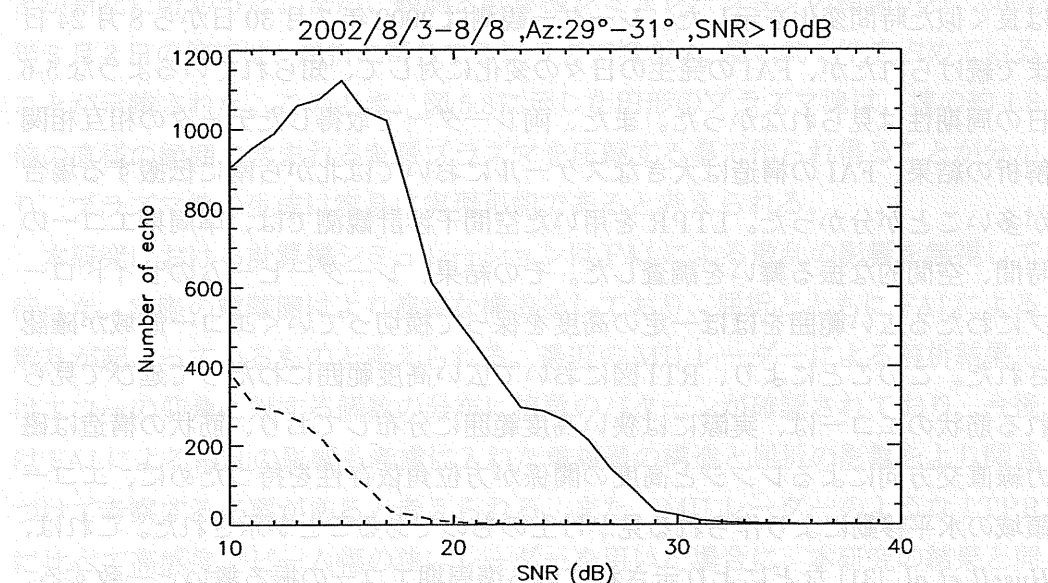


図 5.15: 屈折による分布とガウス分布から推定される観測結果の分布



第6章 結論

本研究では中緯度電離圏 E 領域に発生する準周期エコーの空間構造の解明を目的として、2002 年 7 月下旬から 8 月上旬にかけて行われた SEEK-2 キャンペーンにおけるレーダー観測を基に研究を行った。

本観測では観測ロケット軌道の南方に位置する種子島に 2 台の電離圏観測レーダー (LTPR, FAR) を設置し、観測を行った。観測ロケットは日本時間の 2002 年 8 月 3 日 23 時 24 分、39 分に相次いで打ち上げられた。両レーダーはその前後の準周期エコーのデータ取得に成功し、両レーダーの観測した準周期エコーは良く似た時間変化を示した。レーダー観測は 2002 年 7 月 30 日から 8 月 24 日まで続けられたが、FAI の発生の日々の変化に対して、知られているような 5-6 日の周期性は見られなかった。また、両レーダーで取得したデータの相互相関解析の結果、FAI の構造は大きなスケールにおいては北から南に伝搬する場合が多いことが分かった。LTPR を用いた空間干渉計観測では、準周期エコーの時間、空間的な振る舞いを調査した。その結果、レーダービームのサイドローブにわたる広い範囲をほぼ一定の高度を保って横切っていくエコー領域が確認された。このことにより、RTI 図において広い高度範囲にわたって延びて見られる筋状のエコーは、実際には狭い高度範囲に分布しており、筋状の構造は磁力線直交方向によるレンジと高度の関係が方位角依存性を持つために、エコー領域の水平移動により作られる見かけ上のものであることが示された。これは、*Hysell et al.* [31] などにより示されている準周期エコーの振る舞いと一致する。また、エコー領域の移動の原因を調べるために、干渉計観測により決定されたエコー領域の移動と流星エコーから導出される中性風の関係を調査した。その結果、水平方向に細長く延びたエコー領域を仮定したとき、エコー領域は北西から南東に延びた構造が多いことが分かった。

FAI エコーは地球の磁力線に対する極めて高い直交性が知られているが、レーダー観測から磁力線直交方向から 1° 以上もはずれた方向から返ってくるエコーも多く存在することが分かった。また、直交方向からはずれた方向から返ってくるエコーは SN 比が低い傾向があることが分かった。この結果から、電離層内において電波が屈折を受けており、屈折によってエコー強度が低下している可能性が考えられる。そこで、電離層内における電波の屈折の影響を定量的に評価することを目的として、計算機シミュレーションを行った。本研究では、

FDTD 法を用いた計算機シミュレーションにより電離層での電波の屈折を検証した。その結果、観測で得られた磁力線直交方向からはずれる角度にほぼ等しい約 1.5° の屈折が電離層内で起こり得ることが分かった。Hysell et al. [46] におけるレイトレーシング法を用いた研究では、屈折する角度はプラズマ密度の最大値に比例することが知られている。また、屈折する角度はプラズマ密度が減衰する勾配の指数に依存しており、プラズマ塊の大きさには依存しない。本研究におけるシミュレーションでは、屈折する角度はプラズマ密度の最大値と最小値の差に比例すること、地球の磁場は電波の屈折にほとんど影響しないことが新たに分かった。また、観測と計算機シミュレーションの結果から、2002 年 8 月 3 日の例では、屈折に寄与するプラズマ塊が E_s 層の約 $1/7$ を占めていることが示唆された。このとき、図 5.8 に示した円形のプラズマ塊は、塊の約 1.8 倍の直径の範囲に含まれる背景プラズマを圧縮する事で作られ得ることが分かり、プラズマ塊の生成は容易に実現可能であると考えられる。

本研究における計算機シミュレーションは FAI による散乱の影響を無視して行った。実際の電離層はより複雑な構造をしており、屈折とともに FAI による散乱が起こっているものと考えられる。最近の MU レーダーによる解析結果ではエコーの仰角に対する個数の分布に複数のパターンが確認されており、今後は FAI による散乱の影響も考慮に入れた電離層の構造と屈折の影響をより関連づけて考察する必要があると考えられる。また、MU レーダーのような LTPR に比べて高感度でビーム幅の狭いレーダーを用いた場合に、本研究の結果と同様に準周期エコーの構造を説明可能であるかに関しても、今後のさらなる研究が待たれる。

参考文献

- [1] Kelley, M. C.: *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*, Int. Geophys. Ser., Vol. 43, Academic Press, San Diego, Calif. (1989).
- [2] Fejer, B. G. and M. C. Kelley: Ionospheric irregularities, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 18, pp. 401-454 (1980).
- [3] Fukao, S., T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira: The MU radar with an active phased array system 1. Antenna and power amplifiers, *Radio Sci.*, Vol. 20, pp. 1155-1168 (1985).
- [4] Fukao, S., T. Tsuda, T. Sato, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihira: The MU radar with an active phased array system 2. In-house equipment, *Radio Sci.*, Vol. 20, pp. 1169-1176 (1985).
- [5] Yamamoto, M., S. Fukao, R. F. Woodman, T. Ogawa, T. Tsuda and S. Kato: Mid-latitude *E* region field-aligned irregularities observed with the MU radar, *J. Geophys. Res.*, Vol. 96, pp. 15,943-15,949 (1991).
- [6] Fukao, S., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, H. Hayakawa and T. Mukai: The SEEK (Sporadic-*E* Experiment over Kyushu) campaign, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 25, pp. 1761-1764 (1998).
- [7] Farley, D. T.: A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 68, pp. 6083-6097 (1963).
- [8] Buneman, O.: Excitation of field aligned sound waves by electron streams, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 10, pp. 285-287 (1963).
- [9] K., M., T. Tsuda and H. Maeda: Theoretical interpretation of the equatorial sporadic *E* layers, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 11, pp. 406-407 (1963).
- [10] Balsley, B. B.: Some characteristics of non-two-stream irregularities in the equatorial electrojet, *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, pp. 2333-2347 (1969).
- [11] Cohen, R. and K. L. Bowles: Secondary irregularities in the equatorial electrojet, *J. Geophys. Res.*, Vol. 72, pp. 885-894 (1967).
- [12] Ecklund, W. L., D. A. Carter and B. B. Balsley: Gradient drift irregularities in mid-latitude sporadic *E*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, pp. 858-862 (1981).
- [13] Tanaka, T. and S. V. Venkateswaran: Characteristics of field-aligned *E*-

- region irregularities over Iioka (36°N), Japan-I, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, pp. 381-393 (1982).
- [14] Tanaka, T. and S. V. Venkateswaran: Characteristics of field-aligned *E*-region irregularities over Iioka (36°N), Japan-II, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 44, pp. 395-406 (1982).
- [15] Rogister, A. and N. D'Angelo: Type II irregularities in the equatorial electrojet, *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, pp. 3879-3887 (1970).
- [16] Sudan, R. N., J. Akinrimisi and D. T. Farley: Generation of small-scale irregularities in the equatorial electrojet, *J. Geophys. Res.*, Vol. 78, pp. 240-248 (1973).
- [17] 中原智勇: MU レーダーによる電離圏 *E* 領域沿磁力線イレギュラリティの観測, 学士論文, 京都大学工学部 (1990).
- [18] Yamamoto, M., S. Fukao, T. Ogawa, T. Tsuda and S. Kato: A morphological study on mid-latitude *E*-region field-aligned irregularities with the MU radar, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 54, pp. 769-777 (1992).
- [19] 松本崇: MU レーダーによる電離圏 *E* 領域沿磁力線イレギュラリティの研究, 学士論文, 京都大学工学部 (1991).
- [20] Yamamoto, M., N. Komoda, S. Fukao, R. T. Tsunoda, T. Ogawa and T. Tsuda: Spatial structure of the *E* region field-aligned irregularities revealed by the MU radar, *Radio Sci.*, Vol. 29, pp. 337-347 (1994).
- [21] 古茂田典夫: MU レーダーによる電離圏 *E* 領域沿磁力線イレギュラリティの波動構造の研究, 修士論文, 京都大学工学研究科 (1993).
- [22] Yamamoto, M., S. Fukao, R. T. Tsunoda, K. Igarashi and T. Ogawa: Preliminary results from joint measurements of *E*-region field-aligned irregularities using the MU radar and the frequency-agile radar, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, Vol. 59, pp. 1655-1663 (1997).
- [23] Rao, P. B., M. Yamamoto, A. Uchida, I. Hassenpflug and S. Fukao: MU radar observations of kilometer-scale waves in the midlatitude lower *E*-region, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp. 3667-3670 (2000).
- [24] 内田敦: 中緯度電離圏 *E* 領域の低高度準周期エコーに関する研究, 修士論文, 京都大学情報学研究科 (2001).
- [25] Woodman, R. F., M. Yamamoto and S. Fukao: Gravity wave modulation

- of gradient drift instabilities in mid-latitude sporadic *E* irregularities, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 18, pp. 1197–1200 (1991).
- [26] Tsunoda, R. T., S. Fukao and M. Yamamoto: On the origin of quasi-periodic radar backscatter from midlatitude sporadic *E*, *Radio Sci.*, Vol. 29, pp. 349–365 (1994).
 - [27] Larsen, M. F., S. Fukao, M. Yamamoto, R. Tsunoda, K. Igarashi and T. Ono: The SEEK chemical release experiment: Observed neutral wind profile in a region of sporadic *E*, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 25, pp. 1789–1792 (1998).
 - [28] Maruyama, T.: A possible mechanism for echo striation generation of radar backscatter from midlatitude sporadic *E*, *Radio Sci.*, Vol. 35, pp. 1155–1164 (2000).
 - [29] Yokoyama, T., M. Yamamoto and S. Fukao: Computer simulation of polarization electric fields as a source of midlatitude field-aligned irregularities, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108(A2), 1054, doi:10.1029/2002JA009513 (2003).
 - [30] Yokoyama, T., M. Yamamoto, S. Fukao and R. B. Cosgrove: 3-D simulation on generation of polarization electric field in the midlatitude *E*-region ionosphere, *J. Geophys. Res.*, in press (2003).
 - [31] Hysell, D. L. and J. D. Burcham: The 30-MHz radar interferometer studies of midlatitude *E* region irregularities, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, pp. 12,797–12,812 (2000).
 - [32] Woodman, R. F.: Inclination of the geomagnetic field measured by an incoherent scatter technique, *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, pp. 178–184 (1971).
 - [33] Farley, D. T., H. M. Ierikic and B. G. Fejer: Radar Interferometry: A new technique for studying plasma turbulence in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, pp. 1467–1472 (1981).
 - [34] Kudeki, E., B. G. Fejer, D. T. Farley and H. M. Ierikic: Interferometer studies of equatorial *F* region irregularities and drifts, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 8, pp. 377–380 (1981).
 - [35] Kudeki, E., D. T. Farley and B. G. Fejer: Long wavelength irregularities in the equatorial electrojet, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 9, pp. 684–687 (1982).
 - [36] Kudeki, E. and S. J. Franke: Radar interferometer estimate of zonal drift

- variability during spread F , *J. Geophys. Res.*, Vol. 13, pp. 1117–1120 (1986).
- [37] Kudeki, E., B. G. Fejer, D. T. Farley and C. Hanuise: The Condor equatorial electrojet campaign: Radar results, *J. Geophys. Res.*, Vol. 92, pp. 13,561–13,577 (1987).
- [38] Kudeki, E. and D. T. Farley: Aspect sensitivity of equatorial electrojet irregularities and theoretical implications, *J. Geophys. Res.*, Vol. 94, pp. 426–434 (1989).
- [39] Kudeki, E. and F. Sürücü: Radar interferometric imaging of field-aligned plasma irregularities in the equatorial electrojet, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 18, pp. 41–44 (1991).
- [40] Riggan, D., W. E. Swartz, J. Providakes and D. T. Farley: Radar studies of long-wavelength waves associated with mid-latitude sporadic E layers, *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, pp. 8011–8024 (1986).
- [41] Y.-H., C. and C.-Y. Wang: Interferometry observations of three-dimensional spatial structures of sporadic E irregularities using the Chung-Li VHF radar, *Radio Sci.*, Vol. 32, pp. 817–832 (1997).
- [42] 山田仁志夫: Study on the relationship between ionospheric E -region irregularities and neutral winds based on radar observations, 修士論文, 京都大学情報学研究科 (2002).
- [43] McKinley, D. W. R.: *Meteor Science and Engineering*, McGraw-Hill, New York (1961).
- [44] Tsunoda, R. T., M. Yamamoto, K. Igarashi, K. Hocke and S. Fukao: Quasi-periodic radar echoes from midlatitude sporadic E and role of the 5-day planetary wave, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 25, pp. 951–954 (1998).
- [45] 森田重史: MU レーダーを用いた中緯度電離圏 E 領域イレギュラリティエコーの散乱特性に関する研究, 学士論文, 京都大学工学部 (1998).
- [46] Hysell, D. L., M. Yamamoto and S. Fukao: Imaging radar observations and theory of type I and type II quasiperiodic echoes, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107(A11), 1360, doi:10.1029/2002JA009292 (2002).
- [47] 宇野亨: FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社 (1998).
- [48] Sheffield, J.: *Plasma scattering of electromagnetic radiation*, Academic

Press (1975).

- [49] Hunsucker, R. D.: *Radio techniques for probing the terrestrial ionosphere*, Springer-Verlag (1991).
- [50] Yagitani, S., I. Nagano, Y. Omura and H. Matsumoto: Comparison between particle simulation and full-wave analysis for wave propagation in a nonuniform plasma, *Radio Sci.*, Vol. 27, pp. 449-462 (1992).
- [51] Ogawa, T., O. Takahashi, Y. Otsuka, K. Nozaki, M. Yamamoto and K. Kita: Simultaneous middle and upper atmosphere radar and ionospheric sounder observations of midlatitude *E* region irregularities and sporadic *E* layer, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107(A10), 1275, doi:10.1029/2001JA900176 (2002).