

自発励起アルベン波動による 高エネルギーイオンの散乱

(研究課題番号10480097)

平成10 - 11年度科学研究費補助金 (基盤(B)(2))
研究成果報告書

平成12年3月

研究代表者 市村 真
(筑波大学物理工学系)

自発励起アルベン波動による高エネルギーイオンの散乱

(研究課題番号10480097)

目次

. 研究組織・経費	1
. 研究発表	2
. 研究成果概要	
1.はじめに	13
2.アルベンイオンサイクロトロン波動の自発励起	14
3.アルベンイオンサイクロトロン波動の外部励起	16
4.アルベン波動と高エネルギーイオンの振舞	19
5.まとめ	22
謝辞	23
参考文献	24
. 添付資料	25

I. 研究組織・経費

(研究組織)

研究代表者	市村 真	筑波大学物理工学系	助教授
研究分担者	斉藤輝雄	筑波大学物理学系	助教授

(研究経費)

平成10年度	4,400 千円
平成11年度	1,100 千円

合計	5,500千円
----	---------

II . 研究成果発表

(i)主要論文・国際会議録等（資料添付）

1. M.Ichimura, C.Satake, K.Sakata, S.Furukawa, M.Nakamura, T.Saito, S.Tanaka, S.Kanazawa, E.Ishikawa, S.Takayama, S.Motegi, S.Saosaki, Y.Nakashima, H.Hojo, T.Tamano, and K.Yatsu,
"Behaviour of High Energy Ions in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Rev. Sci. Instrum. **70** No.1 (1999) 834-837.
2. S.Tanaka, M.Ichimura, S.Takayama, M.Inutake, S.Kanazawa, M.Nakamura, E.Ishikawa, C.Satake, S.Motegi, T.Saito, H.Hojo, A.Mase, K.Ishii, T.Tamano, K.Yatsu,
"Low Frequency Fluctuations Measured by Probes in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Rev. Sci. Instrum. **70** No.1 (1999) 979-982.
3. H.Hojo, M.Nakamura, S.Tanaka, M.Ichimura and A.Mase,
"Tandem Mirror Transport Study with AIC Fluctuations",
J. Plasma and Fusion Res. SERIES, Vol.2 (1999) 230-233.
4. M.Nakamura, M.Ichimura, S.Tanaka, S.Kanazawa, S.Motegi, S.Saosaki, K.Sakata, C.Nakagawa, K.Kadoya, T.Kawabata, Y.Ohta, H.Hojo, A.Mase, T.Tamano, and K.Yatsu,
"Alfvén Wave Excitation due to Pressure Anisotropy in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
J. Plasma and Fusion Res. SERIES, Vol.2 (1999) 314-317.
5. T.Saito, M.Ichimura, Y.Kiwamoto, A.Mase, Y.Tatematsu, H.Abe, K.Kajiwara, Y.Kogi, M.Nakamura, S.Umehara, Y.Yoshimura, and K.Yatsu,
"Enhanced Axial Loss of Electrons from a Tandem Mirror Induced by an Alfvén Ion Cyclotron Wave",
Phys. Rev. Letters **82** No.6 (1999) 1169-1172.
6. H.Hojo, M.Nakamura, S.Tanaka, M.Ichimura and A.Mase,
"Effects of Alfvén Ion Cyclotron Modes on Tandem Mirror Energy Transport",
J. Plasma Fusion Res. **75** No.9 (1999) 1089-1094.
7. M.Ichimura, H.Hojo, K.Ishii, A.Mase, Y.Nakashima, T.Saito, T.Tamano, K.Yatsu,
"Characteristics of Hot Ions with a Strong RF Heating in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Nuclear Fusion, **39** No.11Y (1999) 1995-1999.

8. M.Ichimura, S.Tanaka, S.Kanazawa, M.Nakamura, S.Motegi, S.Saosaki, K.Sakata, C.Nakagawa, Y.Ohta, K.Kadoya, T.Kawabata, H.Hojo, T.Saito, K.Yatsu,
"Alfvén Eigenmode Excitation near Ion Cyclotron Frequency in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
to be published in J. Accelerator and Plasma Research (2000).
9. M.Ichimura, S.Tanaka, M.Nakamura, K.Sakata, S.Kanazawa, S.Saosaki, C.Nakagawa, Y.Ohta, K.Kadoya, T.Kawabata, M.Oikawa, H.Kano, M.Sasaki, H.Hojo, Y.Nakashima, T.Saito, K.Yatsu,
"Behaviour of Hot Ions and Spontaneously Excited Alfvén Ion Cyclotron Mode in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
6th IAEA Technical Committee Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement Systems, Naka, November 1999.

関連する論文等

10. M.Ichimura, S.Kanazawa, E.Ishikawa, S.Saosaki, S.Tanaka, C.Satake, S.Takayama, M.Nakamura, S.Motegi, K.Sakata, H.Hojo, T.Tamano, and K.Yatsu,
"ICRF Antenna Arrangement for Axisymmetric Plasma Formation in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
1998 ICPP & 25th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Praha,
29 June-3 July, ECA Vol.22C(1998) 1292-1295.
11. S.Tanaka, M.Ichimura, S.Takayama, M.Inutake, S.Furukawa, A.Kumagai, S.Kanazawa, M.Nakamura, E.Ishikawa, C.Satake, S.Motegi, H.Hojo, A.Mase, K.Ishii, T.Tamano, K.Yatsu,
"Macroscopic Stability Control Experiments with Phased Antennas in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
J. Phys. Soc. Jpn. **67** No.6 (1998) 1963-1967.
12. A.Mase, , T.Tokuzawa, L.G.Bruskin, Y.Kogi, S.Kubota, N.Oyama, T.Onuma, N.Goto, A.Itakura, M.Ichimura, H.Hojo, T.Tamano, and K.Yatsu,
"Density Profile and Fluctuation Measurements Using Microwave Reflectometry",
J. Plasma Fusion Res. **74** No.10 (1998) 1189-1200.
13. Y.Kiwamoto, Y.Kikuchi, T.Takahashi, T.Saito, M.Ichimura, Y.Tatematsu, H.Abe, K.Kajiwara, H.Koyama, A.Suzuki, K.Ito, A.Yamazaki, T.Tamano and K.Yatsu,
"Pinhole Camera Imaging of X Rays and Energetic Neutral Atoms for Hot Plasma Diagnostics",
Rev. Sci. Instrum. **69** No.6 (1998) 2574-2575.

14. K.Yatsu, L.G.Bruskin, T.Cho, M.Hamada, M.Hirata, H.Hojo, M.Ichimura, K.Ishii, A.Itakura, I.Katanuma, Y.Kiwamoto, J.Kohagura, S.Kubota, A.Mase, Y.Nakashima, T.Saito, Y.Sakamoto, T.Tamano, Y.Tatematsu, T.Tokuzawa, M.Yoshikawa, "Experimental Study of Potential Confinement of ICRF-Heated Plasma in GAMMA 10", J. Plasma Fusion Res. **74** No.8 (1998) 844-849.
15. I.Katanuma, Y. Kiwamoto, Y. Tatematsu, K. Ishii, T.Saito, K.Yatsu, T.Tamano, "On the Plug Potential Profile in a Tandem Mirror" Phys. Plasmas **5** NO.5 (1998) 1560-1562.
16. K. Kajiwara, T. Saito, H. Miyaue, Y. Tatematsu, Y. Kiwamoto, T. Takahashi, H.Abe, Y. Kikuchi, T. Tamano, and K. Yatsu; "Validity of a Model Electron Distribution Function in an End Region of a Tandem Mirror" J. Phys. Soc. Jpn. **67** No.10 (1998) 3647-3648.
17. T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Kiwamoto, K. Kajiwara, Y. Yoshimura, H. Abe, K. Ito, A. Suzuki, A. Yamazaki, H. Koyama, S. Umehara, K. Ishii, M. Ichimura, A. Mase, T. Tamano, K. Yatsu, "Measurement and Control of End Loss Electrons from the GAMMA 10 Tandem Mirror", transactions of fusion technology, **35** No.1T (1999) 233-237.
18. T.Goto, K Ishii, Y.Katsuki, N.Kikuno, Y.Goi, M.Nagasaki, N.Ishibashi, Y.Ono, M.Yamanashi, M.Ichimura, T.Tamano, and K.Yatsu "New type of compact electrostatic energy analyzer adequate to measurement of charge exchange neutral particles with a low counting yield", Rev. Sci. Instrum. **70** No.1 (1999) 845-848.
19. Y. Nakashima, Y. Hasegawa, M. Shoji, S. Kobayashi, T. Saito, Y. Kiwamoto, T.Cho, A. Mase, M. Ichimura, A. Itakura, M. Hirata, J. Kohagura, K. Md. Islam, M.Oishi, K.Yatsu, M. Yoshikawa, "Charge-Exchange Neutral Particle Measurements on Electron Cyclotron Resonance Heating Experiments in Hot-Ion-Mode Plasmas of the GAMMA 10 Tandem Mirror", Rev. Sci. Instrum. **70** No.1 (1999) 845-848.
20. Y.Kogi, A.Mase, L.G.Bruskin, N.Oyama, T.Tokuzawa, S.Kubota, A.Itakura, M.Ichimura, H.Hojo, T.Tamano, and K.Yatsu, "Cross-Polarization Scattering from Low-Frequency Electromagnetic Waves in the GAMMA10 Tandem Mirror", Rev. Sci. Instrum. **70** No.1 (1999) 991-994.

21. Y. Nakashima, K. Yatsu, K. Iskam, D. Sato, A. Wada, K. Ishii, A. Itakura, M. Ichimura, I. Katanuma, K. Kajiwara, S. Kubota, J. Kohagura, S. Kobayashi, T. Saito, T. Sasuga, Y. Tatematsu, T. Tamano, T. Cho, T. Tokuzawa, Y. Nishizawa, M. Hamada, M. Hirata, L. Bruskin, H. Hojo, A. Mase, R. Minami, M. Yoshikawa,
"Plasma Confinement and Behaviour of Plasma in the Minimum-B Region of the GAMMA 10 Tandem Mirror",
J. Plasma Fusion Res. **75** No.10 (1999) 1211-1218.
22. K. Yatsu, L.G. Bruskin, T. Cho, M. Hamada, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, K.M. Islam, A. Itakura, I. Katanuma, Y. Kiwamoto, J. Kohagura, S. Kubota, A. Mase, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Sakamoto, T. Tamano, Y. Tatematsu, T. Tokuzawa, M. Yoshikawa,
"Recent Results of Experiments on Tandem Mirror GAMMA 10",
transactions of fusion technology, **35** (1999) 52-59.
23. K. Ishii, T. Goto, Y. Goi, N. Kikuno, Y. Katsuki, M. Nagasaki, Y. Ono, N. Ishibashi, M. Yamanashi, I. Katanuma, A. Mase, M. Ichimura, A. Itakura, T. Tamano, and K. Yatsu,
"Observation of Gentle Hump Structure on Energy Distribution Functions of End-Loss Ions in the RF-Driven Tandem Mirror Plasma",
Phys. Rev. Lett. **83** No.17 (1999) 3438-3441.
24. K. Yatsu, L.G. Bruskin, T. Cho, M. Hamada, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, Y. Kiwamoto, J. Kohagura, S. Kubota, A. Mase, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Sakamoto, T. Tamano, Y. Tatematsu, T. Tokuzawa, M. Yoshikawa,
"Plasma Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Nuclear Fusion, **39** No.11Y (1999) 1707-1712.
25. N. Kikuno, K. Ishii, N. Ishibashi, N. Nagasaki, Y. Katsuki, T. Goto, Y. Goi, Y. Ono, M. Yamanashi, A. Nagao, T. Saito, Y. Tatematsu, A. Suzuki, A. Itakura, T. Tamano, K. Yatsu,
"Fast two-dimensional potential measurement at the thermal barrier region of the tandem mirror GAMMA 10",
Rev. Sci. Instrum. **70** No. 11 (1999) 4251-4259.
26. A. Mase, T. Tokuzawa, L.G. Bruskin, Y. Kogi, S. Kubota, N. Oyama, T. Onuma, N. Goto, H. Negishi, Y. Shima, A. Itakura, H. Hojo, M. Ichimura, T. Tamano, K. Yatsu,
"Density Profile and Fluctuation Measurements with Microwave Reflectometry on GAMMA 10",
transactions of fusion technology, **35** (1999) 210-214.

27. K.Ishii, T.Goto, Y.Goi, N.Kikuno, T.Goto, Y.Katsuki, M.Nagasaki, Y.Ono, N.Ishibashi, M.Nakamura, I.Katanuma, A.Mase, M.Ichimura, A.Itakura, T.Tamano, K.Yatsu, "Ion Transport in Velocity Space due to Alfvén-Ion-Cyclotron Fluctuations Excited in the RF Driven Tandem Mirror Plasma", transactions of fusion technology, **35** (1999) 175-179.
28. K.Yatsu, T.Cho, M.Hirata, H.Hojo, M.Ichimura, K.Ishii, A.Itakura, I.Katanuma, J.Kohagura, A.Mase, Y.Nakashima, T.Saito, T.Tamano, S.Tanaka, Y.Tatematsu, M.Yoshikawa, "Potential Control for Improvement of Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror", Czechoslova Journal of Physics, **49** (1999), Suppl. S3, 155-166.
29. K.Yatsu, T.Cho, M.Ichimura, K.Ishii, Y.Ishimoto, K.Isulam, K.Kajiwara, I.Katanuma, S.Kobayashi, J.Kohagura, A.Mase, R.Minami, Y.Nakashima, Y.Nishizawa, T.Numakura, T.Saito, T.Sasuga, D.Sato, A.Wada, "Reduction of Radial Loss by Conducting Plates Installed in Anchor Region of GAMMA 10", to be published in Chinese Physics Letters (2000)
30. K.Yatsu, R.Baba, T.Cho, M.Ichimura, K.Ishii, Y.Ishimoto, K.Islam, I.Katanuma, S.Kobayashi, J.Kohagura, Y.Nakashima, Y.Nishizawa, T.Saito, T.Sasuga, S.Tanaka, Y.Tatematsu, D.Sato, A.Wada, M.Yoshida, "Recent Development of Potential Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror", to be published in J. Accelerator and Plasma Research (2000).
31. M.Ichimura, T.Cho, M.Hirata, H.Hojo, K.Ishii, K. A.Itakura, I.Katanuma, J.Kohagura, Y.Nakashima, T.Saito, T.Tamano, Y.Tatematsu, K.Yatsu, M.Yoshikawa, "Long-Pulse Operation of the GAMMA 10 Tandem Mirror", to be published in J. Plasma and Fusion Res. SERIES, (2000).
32. T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Kiwamoto¹⁾, H. Abe, M. Ishikawa, K. Kajiwara, H. Koyama, A. Suzuki, T. Cho, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, A. Mase, N. Oyama, K. Yatsu, "Axi-symmetrization of Radiation Pattern and Two Wave Heating of Fundamental ECRH in GAMMA 10 " to be published in Fusion Engineering and Design (2000).

33. Y. Tetematsu, T. Saito, Y. Kiwamoto, K. Ito, H. Abe, M. Ishikawa, H. Koyama, I. Katanuma, K. Yatsu
"Cyclotron Emission Spectra from Collisionless Electrons Resonantly Heated by Cyclotron Waves in a Magnetic Mirror",
to be published in Fusion Engineering and Design.
34. K. Yatsu, L.G. Bruskin, T. Cho, M. Hamada, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, Y. Kiwamoto, J. Kohagura, S. Kubota, A. Mase, Y. Nakashima, T. Saito, Y. Sakamoto, T. Tamano, Y. Tatematsu, T. Tokuzawa, M. Yoshikawa,
"Plasma Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
in Fusion Energy 1998 (17th IAEA Fusion Energy Conference Proceedings, Yokohama, 18-24 October 1998) Vol.1, IAEA, Vienna (1999) p.391-p.398
35. M. Ichimura, H. Hojo, K. Ishii, A. Mase, Y. Nakashima, T. Saito, T. Tamano, K. Yatsu,
"Characteristics of Hot Ions with a Strong RF Heating in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
in Fusion Energy 1998 (17th IAEA Fusion Energy Conference Proceedings, Yokohama, 18-24 October 1998) Vol.3, IAEA, Vienna (1999) p.911-p.914.
36. K. Yatsu, T. Cho, M. Ichimura, K. Ishii, Y. Ishimoto, K. Isulam, K. Kajiwara, I. Katanuma, S. Kobayashi, J. Kohagura, A. Mase, R. Minami, Y. Nakashima, Y. Nishizawa, T. Numakura, T. Saito, T. Sasuga, D. Sato, A. Wada,
"Plasma Confinement in GAMMA 10 Tandem Mirror",
Bull. Am. Phys. Soc. **43** (1998) 1719.
37. K. Yatsu, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, A. Mase, Y. Nakashima, T. Saito, T. Tamano, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa,
"Improvement and Longer Operation of Potential Confinement in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
26th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Maastricht, 14-18 June, ECA Vol.23J (1999) 461-464.
38. K. Yatsu, T. Cho, M. Hirata, H. Hojo, M. Ichimura, K. Ishii, A. Itakura, I. Katanuma, J. Kohagura, Y. Nakashima, T. Saito, T. Tamano, S. Tanaka, Y. Tatematsu, M. Yoshikawa,
"Development of Potential Confinement in GAMMA 10 Tandem Mirror"
Bull. Am. Phys. Soc. 44 (1999) 47.

(ii) 学会等口頭発表

主要な口頭発表

1. 中村基征、茂木信二、太田百合子、市村 真、田中 覚、金澤清光、竿崎宗春、坂田勝亮、中川智博、角谷清臣、川端敏毅、北條仁士、玉野輝男、谷津 潔
GAMMA10におけるAIC不安定性の励起条件
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998.12 筑波大学) 2aA4p
2. 中村基征、市村真、太田百合子、田中覚、金澤清光、竿崎宗春、中川智博、坂田勝亮、角谷清臣、川端敏毅、及川正崇、佐々木誠、加納英和、間瀬淳、北條仁士、玉野輝男、谷津潔
AIC波動の軸方向構造III
プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA13p
3. 中村基征
GAMMA10におけるAlfven Ion Cyclotron不安定波動の励起と軸方向閉じ込めへの影響」
第2回「若手科学者によるプラズマ研究会」(原研、1999年2月15-17日)
4. 茂木信二、太田百合子、中村基征、市村 真、田中 覚、金澤清光、竿崎宗春、坂田勝亮、角谷清臣、川端敏毅、北條仁士、間瀬 淳、玉野輝男、谷津 潔
ICRF波動入射によるプラズマ計測II
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998.12 筑波大学) 2aA2p
5. 太田百合子、市村真、茂木信二、中村基征、田中覚、金澤清光、竿崎宗春、坂田勝亮、中川智博、角谷清臣、川端敏毅、及川正崇、加納英和、佐々木誠、北條仁士、板倉昭慶、玉野輝男、谷津潔
ICRF波動入射によるプラズマ計測III
プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA5p
6. 坂田勝亮、川端敏毅、市村 真、中村基征、田中 覚、金澤清光、茂木信二、竿崎宗春、中川智博、太田百合子、角谷清臣、斉藤輝雄、北條仁士、石井亀男、中嶋洋輔、玉野輝男、谷津 潔
ガンマ10における半導体検出器を用いた高エネルギーイオン測定
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998.12 筑波大学) 2aA8p

7. 坂田勝亮、川端敏毅、加納英和、市村真、中村基征、田中覚、金澤清光、竿崎宗春、中川智博、太田百合子、角谷清臣、及川正崇、佐々木誠、斉藤輝雄、北條仁士、石井亀雄、中嶋洋輔、玉野輝男、谷津潔
GAMMA10における半導体検出器を用いた高エネルギーイオン測定II
プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA3p
8. 斉藤輝雄、市村真、際本泰士、立松芳典、間瀬淳、梅原成範、蛎崎マリア、梶原健、阿部拓、伊藤清一、石川正男、小山大樹、谷津潔
ガンマ10プラズマの立ち上がり時の端損失電子の特性
日本物理学会第54回年回(1999年3月、広島大学) 28a-XH12.
9. 田中覚、市村真、犬竹正明、竿崎宗春、角谷清臣、金澤清光、中村基征、坂田勝亮、中川智博、川端敏毅、太田百合子、加納英和、及川正崇、佐々木誠、北條仁士、石井亀男、玉野輝男、谷津潔
ガンマ10における巨視的安定性の制御実験
プラズマ・核融合学会年会 (1999.11 東北大学) 2aA4
10. 角谷清臣、田中覚、市村真、金澤清光、中村基征、竿崎宗春、坂田勝亮、中川智博、太田百合子、川端敏毅、及川正崇、佐々木誠、加納英和、玉野輝男、谷津潔
GAMMA10における低周波磁場揺動の解析
プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA11p
11. 竿崎宗春、田中 覚、市村 真、中川智博、角谷清臣、金澤清光、中村基征、茂木信二、坂田勝亮、太田百合子、川端敏毅、北條仁士、間瀬 淳、石井亀男、玉野輝男、谷津 潔
ガンマ10における高周波イオン加熱と巨視的不安定性
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998.12 筑波大学) 2aA1p
13. 竿崎宗春、田中覚、角谷清臣、市村真、金澤清光、中村基征、坂田勝亮、中川智博、太田百合子、川端敏毅、及川正崇、佐々木誠、加納英和、小林進一、吉川正志、石井亀男、北條仁士、中嶋洋輔、玉野輝男、谷津潔
ガンマ10における光検出器を用いた巨視的不安定性の解析
プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA12p
14. 川端敏毅、坂田勝亮、佐々木誠、市村真、中村基征、田中覚、金澤清光、竿崎宗春、中川智博、太田百合子、角谷清臣、及川正崇、加納英和、斉藤輝雄、北條仁士、石井亀雄、中嶋洋輔、玉野輝男、谷津潔
飛行時間型中性粒子分析器によるガンマ10アンカー部イオン温度測定
プラズマ・核融合学会第16回年会 (1999.11 東北大学) 2aA2p

15. 市村 真

ガンマ10におけるアルベン波動と高エネルギーイオンの振舞
「高速イオンによって励起されるMHD不安定性とプラズマ閉じ込めへの影響」
研究会 (NIFS、1999年2月9-10日)

16. 市村 真

ガンマ10におけるアルベン波実験
仙台"プラズマフォーラム"「電磁流体现象研究会」(東北大学工学部、
2000年2月24-25日)

関連する口頭発表

17. 金澤清光、市村 真、石川英治、竿崎宗春、田中 覚、佐竹周子、高山星一、
中村基征、茂木信二、坂田勝亮、北條仁士、玉野輝男、谷津 潔

ガンマ10における高周波アンテナによるプラズマ軸対称性制御
第2回核融合エネルギー連合講演会 (1998.6 科学技術館) A40

18. 中川智博、市村 真、金澤清光、竿崎宗春、田中 覚、中村基征、茂木信二、
坂田勝亮、太田百合子、角谷清臣、川端敏毅、玉野輝男、谷津 潔

ガンマ10におけるICRF波動入射と加熱特性
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998.12 筑波大学) 2aA3p

19. 斉藤輝雄、梶原健、立松芳典、際本泰士、イスラム・カイルル、阿部拓、伊藤清一、
鈴木明宏、山崎彰、石川正男、梅原成範、小山大樹、佐藤大輔、和田篤志、
中嶋洋輔、玉野輝男、谷津潔

ガンマ10におけるエンドプレートを介した電流循環II
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998年12月, 筑波大学) 1pB9

20. 立松芳典, 斉藤輝雄, 際本泰士, 梶原健, 阿部拓, 伊藤清一, 鈴木昭宏, 山崎彰,
石川正男, 梅原成範, 小山大樹, 玉野輝男, 谷津潔,

不均一磁場中における加熱共鳴点近傍でのサイクロトロン吸収と放射
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998年12月, 筑波大学) 1pB10

21. 阿部拓、際本泰士、斉藤輝雄、立松芳典、山崎彰、梶原健、伊藤清一、鈴木昭宏、
小山大樹、石川正男、梅原成範、市村真、玉野輝男、谷津潔

タンデムミラープラズマにおける熱流計測
プラズマ・核融合学会第15回年会 (1998年12月, 筑波大学) 3aA4p.

22. 伊藤清一、際本泰士、斉藤輝雄、立松芳典、梶原健、阿部拓、鈴木昭宏、山崎彰、石川正男、梅原成範、小山大樹、谷津潔
電子サイクロトロン共鳴加熱に応答するプラズマからのマイクロ波放射
プラズマ・核融合学会第15回年会（1998年12月、筑波大学）3aA7p
23. 山崎彰、際本泰士、斉藤輝雄、立松芳典、阿部拓、梶原健、伊藤清一、鈴木昭宏、石川正男、梅原成範、小山大樹、谷津潔
ガンマ10プラグ/バリア部における熱流計測
プラズマ・核融合学会第15回年会（1998年12月、筑波大学）3aA5p.
24. 鈴木昭宏 斉藤輝雄、際本泰士（京都大総合人間学部）立松芳典、梶原健、阿部拓、伊藤清一、山崎彰、石川正男、梅原成範、小山大樹、谷津潔
ガンマ10におけるプラグE C R Hアンテナシステムの変更とその効果
プラズマ・核融合学会第15回年会（1998年12月、筑波大学）3aA8p.
25. 伊藤清一、際本泰士、斉藤輝雄、立松芳典、阿部拓、梶原健、鈴木昭宏、山崎彰、松本和也、小山大樹、石川正男、梅原成範、間瀬淳、玉野輝男、谷津潔
電子サイクロトロン加熱時に誘起される共鳴周波数近傍の波動の観測
物理学会秋の分科会（1998年9月、琉球大学、沖縄国際大学）27aC-2.
26. 梶原健、斉藤輝雄、際本泰士、立松芳典、石井亀男、阿部拓、伊藤清一、鈴木昭宏、山崎彰、石川正男、小山大樹、玉野輝男、谷津潔
ガンマ10プラグ/バリア部における径方向電流の測定
日本物理学会第54回年回（1999年3月、広島大学）28aXH-11.
27. 中川智博、市村真、田中覚、金澤清光、中村基征、竿崎宗春、坂田勝亮、角谷清臣、太田百合子、川端敏毅、及川正崇、加納英和、佐々木誠、斉藤輝雄、玉野輝男、谷津潔
GAMMA10における高周波($\omega / \omega_{ci} > 10$)を用いた高周波プラズマ生成
プラズマ・核融合学会第16回年会（1999.11 東北大学）2aA4p
28. 立松芳典、斉藤輝雄、際本泰士、阿部拓、石川正男、小山大樹、片沼伊佐夫、谷津潔
ミラー磁場中における2ビームマイクロ波入射による電子加熱の検討
プラズマ・核融合学会第16回年会（1999.11 東北大学）23pC10p

29. 齊藤輝雄、阿部拓、石井亀男、石川正男、板倉昭慶、市村 真、片沼伊佐夫、菊野長與、小波蔵純子、小林進二、小山大樹、流石岳史、嶋 頼子、立松芳典、田中覚、玉野輝男、長照二、中嶋洋輔、西沢祐樹、馬場隆太、平田真史、北條仁士、間瀬淳、谷津潔、吉川正志、吉田麻衣子
ガンマ10プラグ部電子加熱の軸対称化と電位閉じ込めの長時間維持
プラズマ・核融合学会第16回年会（1999.11 東北大学）：25aA3
30. 阿部拓、齊藤輝雄、立松芳典、石川正男、小山大樹、際本泰士、市村真、石井亀男、板倉昭慶、谷津潔
タンデムミラープラズマにおける熱流計測 (III)
プラズマ・核融合学会第16回年会（1999.11 東北大学）23pC8p
31. 石川正男、齊藤輝雄、立松芳典、際本泰士、阿部拓、小山大樹、長照二、石井亀男、谷津潔
ガンマ10におけるプラグECRH用新アンテナの導入
プラズマ・核融合学会第16回年会（1999.11 東北大学）23pC9p
32. 小山大樹、齊藤輝雄、立松芳典、際本泰士、阿部拓、石川正男、谷津潔
吸収法による荷電交換高速中性粒子のエネルギー空間分布計測
プラズマ・核融合学会第16回年会（1999.11 東北大学）25pC23p

IV . 添付資料

1. M.Ichimura, C.Satake, K.Sakata, et al.,
"Behaviour of High Energy Ions in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Rev. Sci. Instrum. **70** No.1 (1999) 834-837.
2. S.Tanaka, M.Ichimura, S.Takayama, et al.,
"Low Frequency Fluctuations Measured by Probes in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Rev. Sci. Instrum. **70** No.1 (1999) 979-982.
3. H.Hojo, M.Nakamura, S.Tanaka, M.Ichimura and A.Mase,
"Tandem Mirror Transport Study with AIC Fluctuations",
J. Plasma and Fusion Res. SERIES, Vol.2 (1999) 230-233.
4. M.Nakamura, M.Ichimura, S.Tanaka, et al.,
"Alfvén Wave Excitation due to Pressure Anisotropy in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
J. Plasma and Fusion Res. SERIES, Vol.2 (1999) 314-317.
5. T.Saito, M.Ichimura, Y.Kiwamoto, et al.,
"Enhanced Axial Loss of Electrons from a Tandem Mirror Induced by an Alfvén Ion Cyclotron
Wave",
Phys. Rev. Letters **82** No.6 (1999) 1169-1172.
6. H.Hojo, M.Nakamura, S.Tanaka, M.Ichimura and A.Mase,
"Effects of Alfvén Ion Cyclotron Modes on Tandem Mirror Energy Transport",
J. Plasma Fusion Res. **75** No.9 (1999) 1089-1094.
7. M.Ichimura, H.Hojo, K.Ishii, et al.,
"Characteristics of Hot Ions with a Strong RF Heating in the GAMMA 10 Tandem Mirror",
Nuclear Fusion, **39** No.11Y (1999) 1995-1999.
8. M.Ichimura, S.Tanaka, S.Kanazawa, et al.,
"Alfvén Eigenmode Excitation near Ion Cyclotron Frequency in the GAMMA 10 Tandem
Mirror",
to be published in J. Accelerator and Plasma Research (2000).
9. M.Ichimura, S.Tanaka, M.Nakamura, et al.,
"Behaviour of Hot Ions and Spontaneously Excited Alfvén Ion Cyclotron Mode in the
GAMMA 10 Tandem Mirror",
6th IAEA Technical Committee Meeting on Energetic Particles in Magnetic Confinement
Systems, Naka, November 1999.

III．研究成果概要

1．はじめに

GAMMA10タンデムミラーセントラル部では、イオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)の高周波を用いたイオン加熱の結果、強い温度非等方性を持つ高温プラズマが形成され、温度の非等方性に起因するアルペンイオンサイクロトロン(AIC)波動が自発的に励起される。このモードは理論的研究[1-8]に比べて、実験的研究は少なく、実験室プラズマでは、米国のTMXタンデムミラープラグ部で初めて観測され[9]、TARAタンデムミラーのセントラル部[10]、そしてGAMMA10タンデムミラーのセントラル部[11]での観測が報告されているのみである。GAMMA10で観測されるAIC波動は、理論的に示唆されるプラズマパラメタ[6]に比べて一桁近く小さな領域から磁気プローブで検出されている[12]。現在のところ、GAMMA10での励起と検出されるまで成長する機構については明らかではないが、本課題において、観測される波動の空間的構造の詳細測定、また、能動的に外部よりAIC波動と同じ周波数領域の高周波を入射して、プラズマの応答を調べる等の試みがなされた。

AIC波動のプラズマ閉じ込めに及ぼす影響としては、イオンのピッチ角散乱が示唆されており、タンデムミラー装置の軸方向の閉じ込めに大きな影響を及ぼすことが予想されている。タンデムミラー中のエネルギー輸送におけるAIC波動の効果の理論的検討[添付資料3,6]、及び、AIC波動が電子を加熱する実験的観測[添付資料5]についても報告されている。本課題では、AIC波動の特性と高エネルギーイオンとの相互作用に関する知見を得て、タンデムミラー装置でのプラズマ閉じ込め研究に寄与することを目的としている。

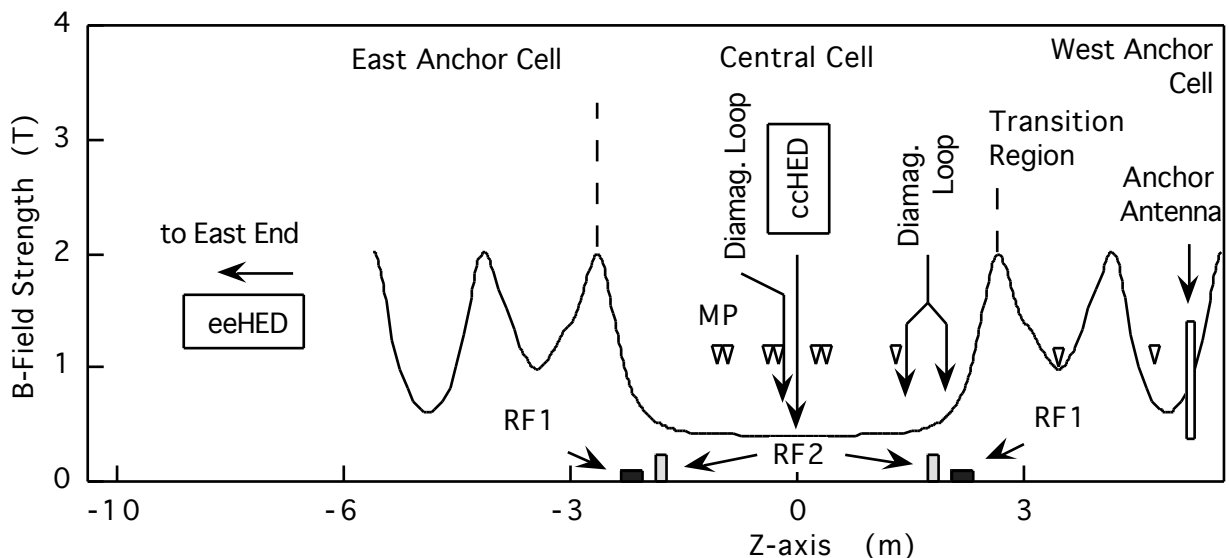


図1 GAMMA10セントラル部付近の磁場強度分布とICRFアンテナ及び計測器の設置位置

図1に、GAMMA10セントラル部の磁場強度分布と高周波アンテナ、計測装置等の設置位置を示す。セントラル両端にアンカー部を加熱するRF1（東10.3MHz、西9.9MHz）とセントラル部加熱用のRF2（6.36MHz）アンテナが設置されている。温度の非等方性

は、異なるミラー比の位置に設置した3本の反磁性ループ(Diamag. Loop)測定により評価する。励起される波動は、各所(図中 印)に設置した磁気プローブ(MP)で検出する。イオンサイクロトロン共鳴加熱の結果、50keVを越す高エネルギーイオンがセントラル部とエンド部に設置した半導体検出器を用いた計測器(ccHED、eeHED)で観測されている。

次節以降で、自発的に励起されるAIC波動、外部アンテナによるAIC波動の励起、及び、波動による高エネルギーイオンの散乱に関する実験結果の概要を報告する。

2. アルペンイオンサイクロトロン波動の自発励起

温度非等方度15、値0.01におけるAIC波動の分散関係を図2に示す。AIC波動は、アルペン遅波のブランチに属し、温度非等方度が1を超えると、イオンサイクロトロン共鳴周波数の0.9倍付近で正の成長率を持つ。GAMMA10で観測されるAIC波動の周波数スペクトル(磁気プローブ信号のパワースペクトル)を

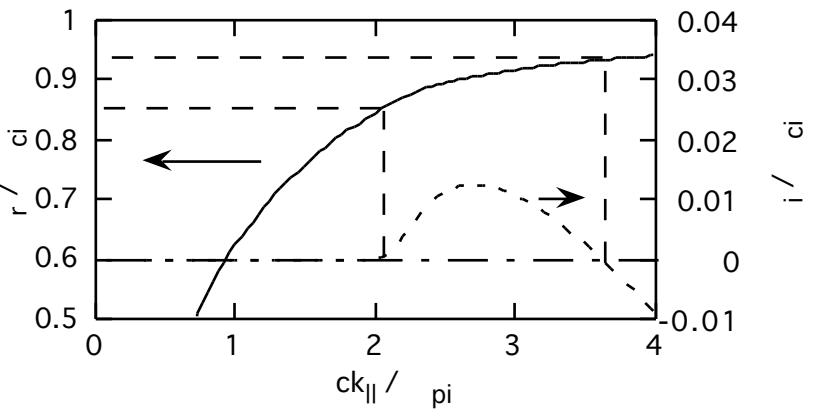


図2 AIC波動の分散関係(非等方度15、値0.01)

図3に示す。図中6.36、9.9、10.3MHzに見られる周波数のピークは、イオン加熱のために外部から加えたRF1、RF2による波動である。6.36MHzのピークのすぐ下に観測される数本の離散的ピークが、自発的に励起されたAIC波動によるものである。この離散的なピークに関しては、空間的構造が既に明らかとなっており、径方向、方位角方向には同じ構造を持ち、軸方向の波数が異なる固有モードであることが報告されている[13]。この離散的ピークを持つAIC波動の特徴は、セントラル部中央より離れた位置(z=-1.1m)でその軸方向の波数を観測した時、時間と共に有限の値から0に漸近することである。軸方向波数が0又は になることは、軸方向に定在波が形成されていることを意味しており、時間と共に変化するプラズマパラメタにより、観測位置が定在波領域に含まれたことを示していると考えられる。

セントラル部に定在波が形成されていることを顕著に示すデータとして、セントラル各部において検出された2本の磁気プローブ間の位相差を図4に示した。図4(a)は、中央から約1m離れた位置における位相差であり、最初有限(伝搬波を意味する)であった各々のモー

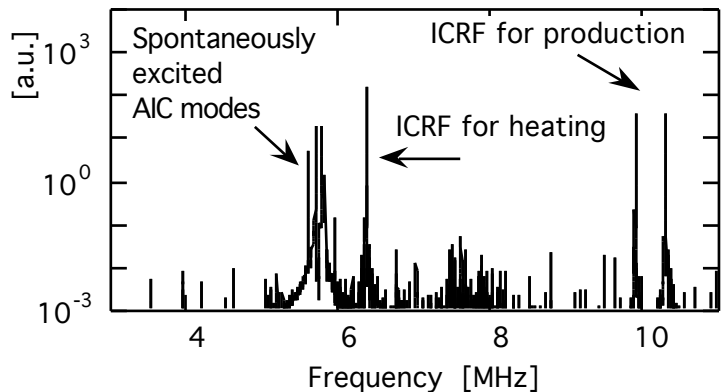


図3 磁気プローブ信号の周波数スペクトル

ドの波数が、時間と共に0となることを示している。図4(b)は、より中央に近い位置における2本のプローブの位相差である。図4(a)と比べた時、AIC波動が励起されると同時に定在波となることがわかる。図4(c)では、(b)とほぼ同じ軸方向位置であるが、時間の経過と共に一つのモードの位相差が0から π に移動して、2本のプローブ間を定在波の節が通過したことを示している。また、図4(d)は、セントラル部両側に隣接する磁場変換部に設置したプローブとの位相差を示しており、有限の値で時間的に変動する様子が示されている。図4より、AIC波動は、セントラル部の中央付近から、定在波を形成しながら時間と共に軸方向に広がり、現在のプラズマパラメタでは、その定在波領域はセントラル部に局在すると解釈できる。

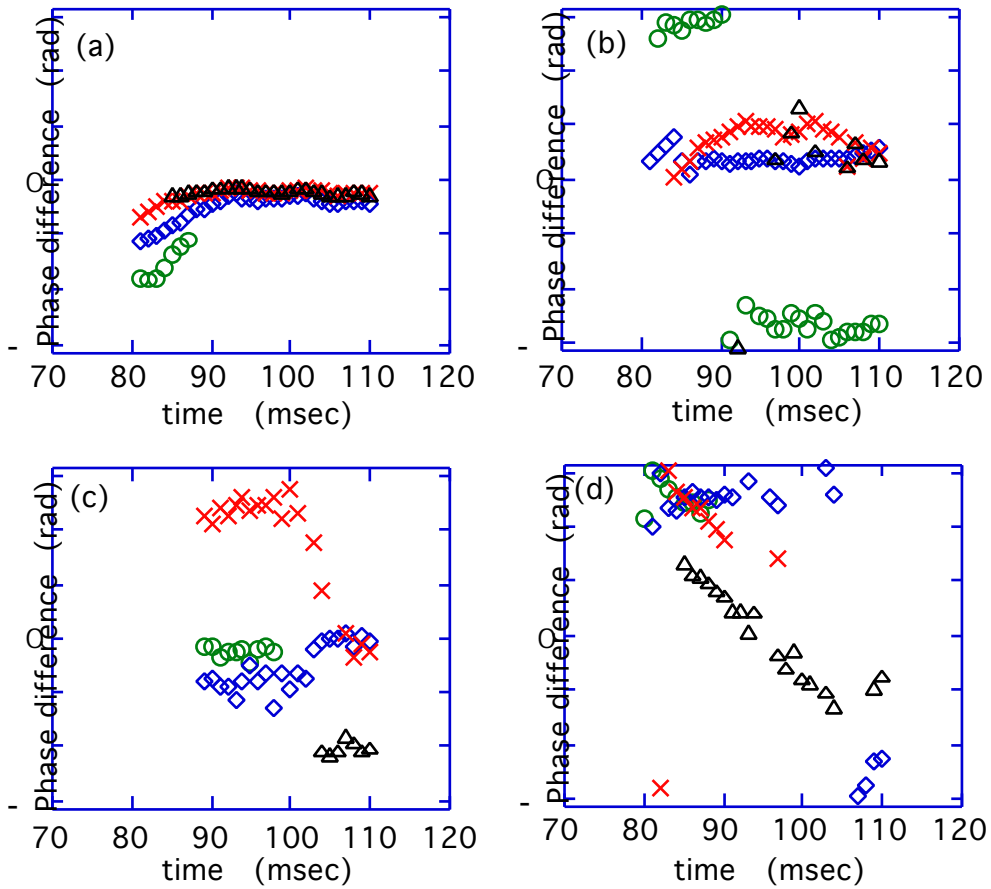


図4 セントラル部における2本の磁気プローブ間の位相差

図1に示したように、GAMMA10セントラル部は、軸方向に磁場強度の変化は緩やかであるが反磁性ループから推定した ω_{UH} の分布は大きく変化している。時間的に変化する定在波形成の境界条件を明らかとするため、加熱周波数を固定し、磁場強度の異なる実験を行った[添付資料4]。磁場強度を弱くすることにより、サイクロトロン共鳴層の位置が中央付近から外側に移り、温度非等方性が弱くなる。図4で用いたプローブにおいて、波数が有限値から0になる時、プローブ前面に境界が存在すると考えることができる。プラズマの非等方性が変化した時、定在波の境界がプラズマのどのパラメタに依存するかを検討した。図5に、加熱周波数を固定した時の、2通りの磁場強度に対する非

等方性をプロットした。中央部での反磁性量が同じであるにもかかわらず非等方性が大きく異なるプラズマが形成されることがわかる。図4(a)のプローブで、位相差が0になる時間のプラズマパラメタを2つの磁場強度の場合について比較した。図6に、プローブ位置でのプラズマ圧力を横軸にとり、プローブ間の位相差をプロットした。図が示すように、非等方性が大きく異なっても、位相差0を示す時のプラズマ圧力は等しいことが明らかとなった。このことより、プラズマ圧力(値)でしきい値を持つアルベン波動として運動論的アルベン波の励起が考えられるが、今後、理論を含めて詳細な検討を進めていく必要がある。

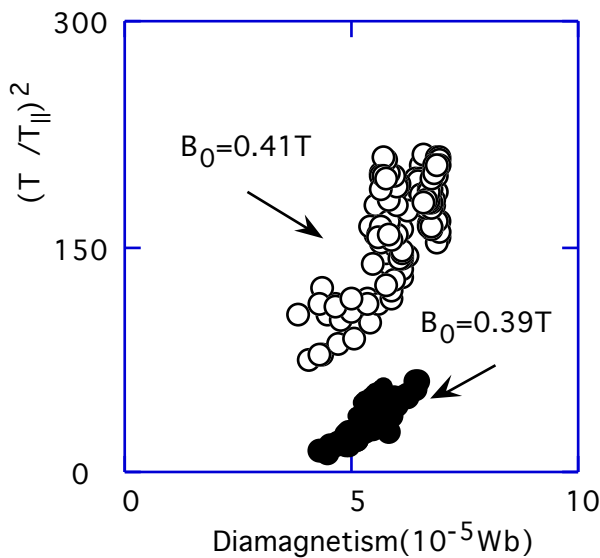


図5 磁場強度の違いによる非等方性の変化

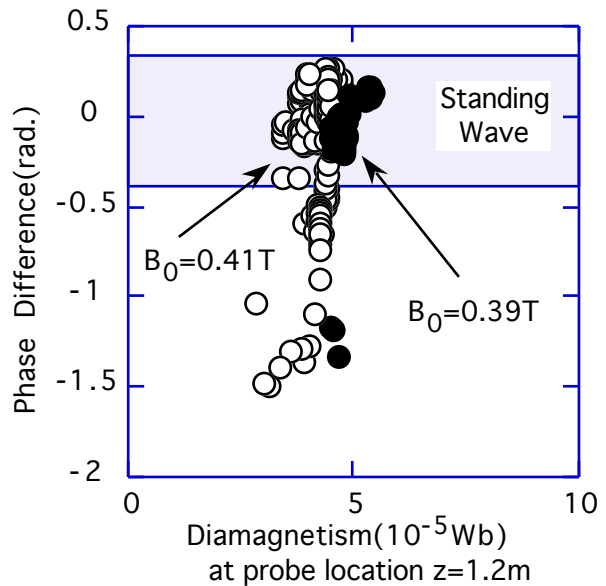


図6 磁気プローブ位置での反磁性量とプローブ間の位相差

3. アルベンイオンサイクロトロン波動の外部励起[添付資料8]

ICRF領域のアルベン波動は、装置の幾何学的大きさと同じオーダーの波長を持つため、その励起は、プラズマ形状・プラズマパラメタの空間構造等で決る境界の存在に強く依存する。この事を利用して、積極的に外部よりICRF領域の高周波を入射した時の、アンテナ負荷やプラズマの応答を計測し、プラズマパラメタの空間分布を推定することを試みている。ここでは、GAMMA10アンカー部におけるAIC波動励起に着目した。GAMMA10セントラル部の両側に位置するアンカー部では、中央付近のRF1サイクロトロン共鳴加熱による高温プラズマ形成により、GAMMA10全体の巨視的安定性を確保している。アンカー部では、セントラル部と同程度の非等方性と値により、AIC波動の励起が予想されるが、現在まで自発励起波動は観測されていない。前節で述べた様に、AIC波動は、軸方向の境界条件で決る固有モードとして励起されているので、現状のアンカー部のプラズマパラメタでは、境界条件が満たされていないことが一つの要因と考えられる。

図7に、波動入射システムの概要を示す。最大出力500Wの広帯域増幅器を用いて発振器出力を増幅し、整合器を介してアンカー部に設置されたアンテナにICRF領域の高周

波を印加する。方向性結合器を用いて、発振電力と反射電力、又、ピックアップコイルを用いて、アンテナに流れる電流を測定してアンテナ負荷を算出する。励起される磁場揺動は、アンカー部に設置した磁気プローブを用いて検出する。アンカー部磁場強度分布とアンテナ及びプローブの位置を図中に示した。アンテナ電流とプローブ信号は、高速AD変換ボードを用いて収集し、FFT解析を行ない入射した周波数における波動の励起等に関する情報を得る。

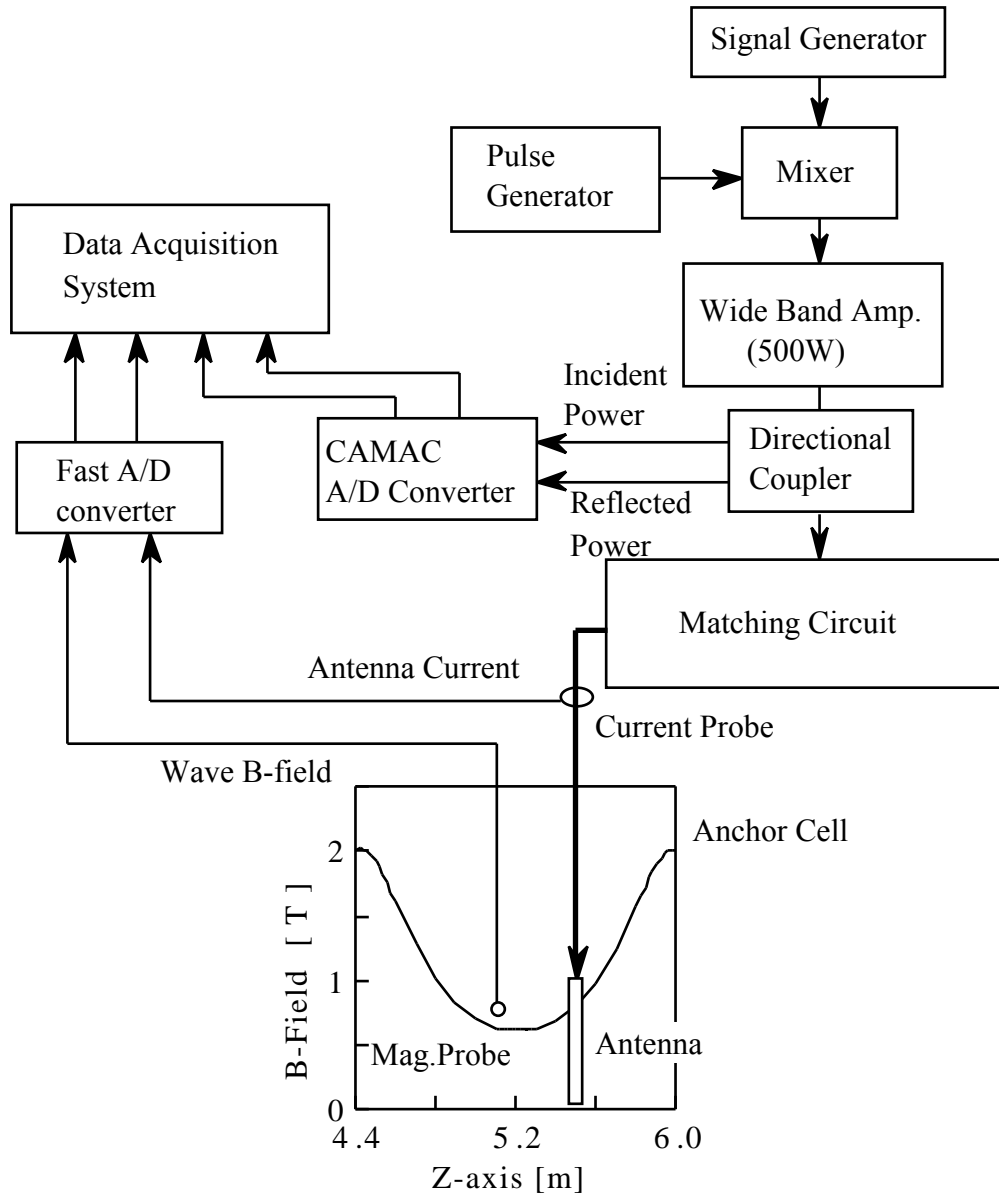


図7 低電力ICRF波動入射システム

図8に得られた信号の例を示す。図8(a)(b)(c)は、各々、入射電力（発振電力 - 反射電力）、アンテナ電流とプラズマ負荷（アンテナ放射電力 / 入射電力）を表している。図中矢印からプラズマが点火しており、点火とともにアンテナ負荷が上昇することがわかる。本課題では、各ショット毎に入射周波数を固定して、アンテナ負荷及び励起される波動の時間変化測定を中心に実験を行った。ここで用いた整合回路は、数MHzの周波数幅で発振器とアンテナとの整合が可能であり、時間的に周波数をステップ状に掃引する

システムの準備を進めている。

アンカー部におけるAIC波動は、中央面での磁場強度に対応する周波数領域としては、8.3MHz近傍で励起されることが予想される。この周波数を中心として測定したアンテナ負荷の周波数依存性を図9に示す。図から明らかなように、8MHz付近を中心に、アンテナ負荷が減少することが観測された。このことは、AIC波動が正の成長率を持つ領域、つまりプラズマ中に自発励起波動が存在するときには、アンテナから放射される電力が抑えられる可能性を示唆している。

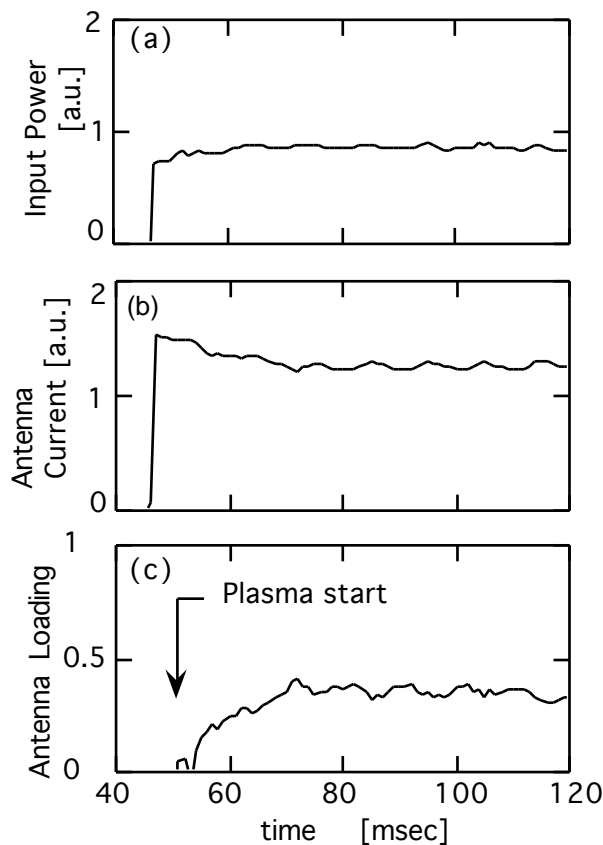


図8 (a)入射電力、(b)アンテナ電流、
(c)アンテナ負荷の時間変化

一方、磁気プローブで観測したプラズマ中の波動は、図10(b)に示す様に、入射周波数依存性を持ち、時間と共にその強度が変化する。図10(a)は、アンカー部の線密度であり、ピークに達した後はほぼ一定値を示している。観測された磁場揺動が、75msec付近で時間的にピークを持つ原因は、現在のところ不明である。周波数依存性に関しては、8.2、8.4MHzで磁場揺動強度が上昇していることがわかる。時間を固定して、横軸に

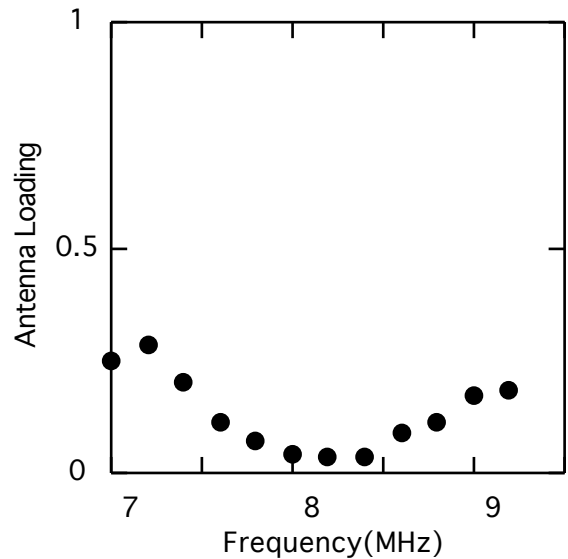


図9 アンテナ負荷の周波数依存性

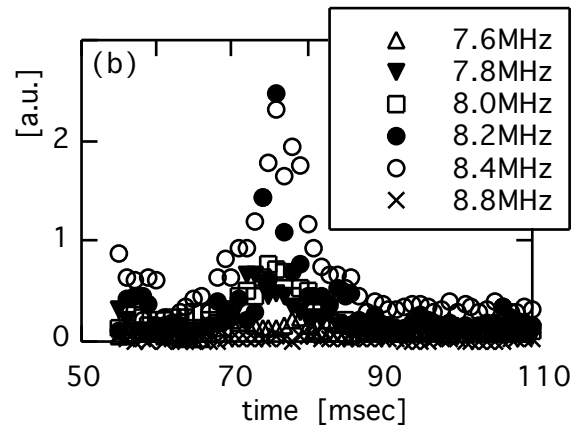
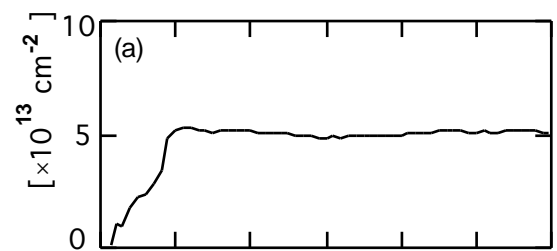


図10 (a)アンカー部線密度、(b)励起波動強度の時間変化

周波数を取り、縦軸に磁場揺動強度をプロットしたものを図11に示す。縦軸は、アンテナ放射電力で規格化されており、波動の励起効率に対応する。8.4MHz付近で共鳴的に磁場揺動が増大することが観測された。これらの結果は、アンカー部では、AIC波動が自発的に励起される条件が満たされているが、検出にかかるまで成長できない条件のもとで、外部からその周波数の高周波を入射することにより、閾値を超え成長できたと解釈することができる。プラズマパラメタ依存性等を詳細に測定して、AIC波動の外部励起をより明らかとすることが今後の課題である。セントラル部において、理論的に予想されるパラメタ領域より一桁近く小さな領域でAIC波動が観測される機構解明の糸口になることが期待される。

4. アルペン波動と高エネルギーイオンの振舞[添付資料7,9]

プラズマ中に励起された揺動が、高エネルギーイオンの閉じ込めに及ぼす影響は、核燃焼プラズマにおける粒子の振舞と関連して重要な課題である。2節で述べた様に、

GAMMA10においては、強いICRF加熱により高温プラズマが形成され、その非等方加熱に起因してAIC波動が自発的に励起されている。イオンサイクロトロン共鳴加熱による高エネルギーイオンの生成とプラズマ中の揺動との相関を調べるため、半導体検出器を用いた高エネルギーイオン計測器(High Energy ion Detector: HED)を従来の東エンド部(eeHED) [13]に加えて、セントラル部中央(ccHED)に設置した[添付資料1]。このccHEDは、2重のピンホールを用いて視野を制限すること、及び、磁力線に対する角度を変化させることにより、 ± 3 度の分解能で捕捉イオンのピッチ角分布を測定することができる。図12にccHEDの模式図を示す。シリコン表面障壁型(SSB)の半導体検出器(TENNELEC CE-50-300-17-CS, 300 μ m)を用いている。空乏層の厚み300 μ mは、

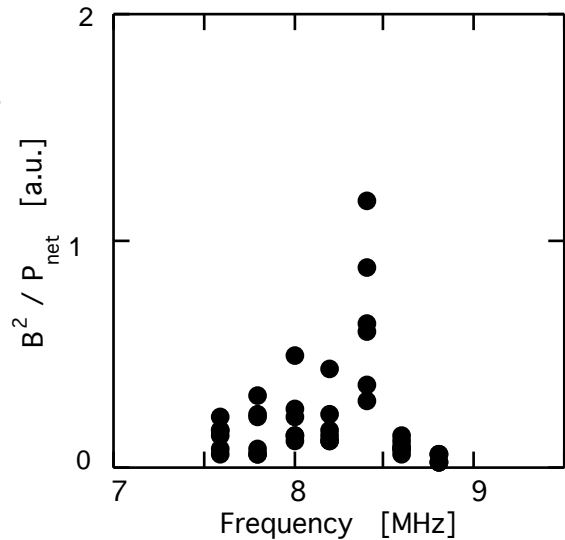


図11 波動励起の周波数依存性

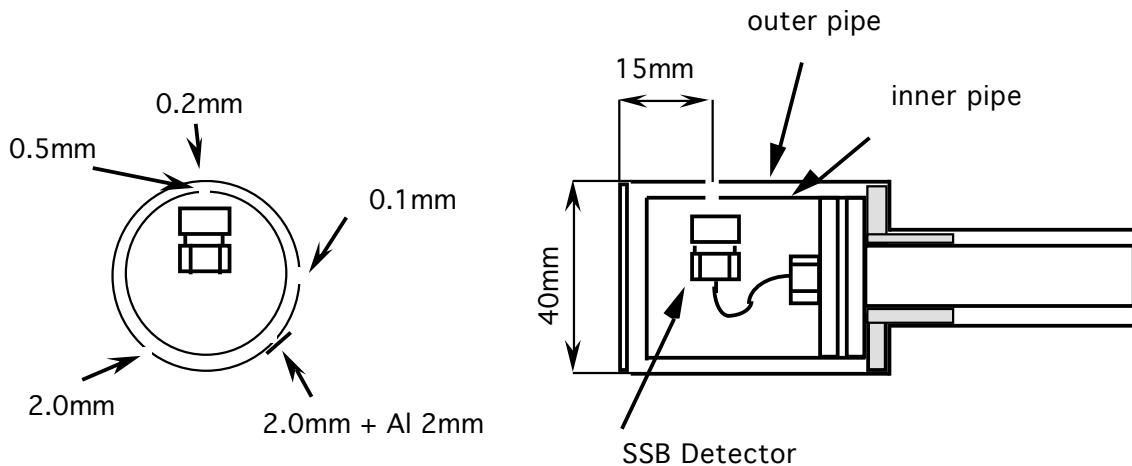


図12 高エネルギーイオン計測器(ccHED)の模式図

高エネルギー水素イオンの計測には充分の厚みであり、感度に関しては参考文献[13]で議論されている。測定されるエネルギーの下限は、入射窓(AI)によって決り、約10keVと推定される。図に示すように、ccHEDは同軸構造をしており、内筒には、直径0.5mmの固定ピンホールが設けられている。外筒には、幾つかの異なる径のピンホールが設けられており、必要に応じて入射量、ピッチ角分解能を選ぶことができる。電子による信号と区別するため、厚さ0.2 μ mのアルミニウム箔を一つのピンホール上に取り付けてある。また、イオンのラマ運動方向から外すことにより、光、X線及び中性粒子との区別ができ、検出される信号がイオンによるものであることを確認している。

図13に反磁性量とccHED信号との関係を示した。イオン加熱とともに反磁性信号が上昇するが、ccHED信号は、加熱が進み反磁性量がある値以上に達すると検出され始める。このことは、半導体検出器が高エネルギーイオンにのみ感度を持つ事を示している。図14に、加熱された高エネルギーイオンのピッチ角分布を示した。サイクロトロン共鳴層の位置に対応するピッチ角は、 $\sin^2 \theta = B_{res} / B_0$ で与えられる。ここで B_{res} と B_0 は、各々共鳴層の位置と中央面での磁場強度である。図中に示したように、共鳴層に相当するピッチ角の小さい側にピークを持つ分布を示すことができる。

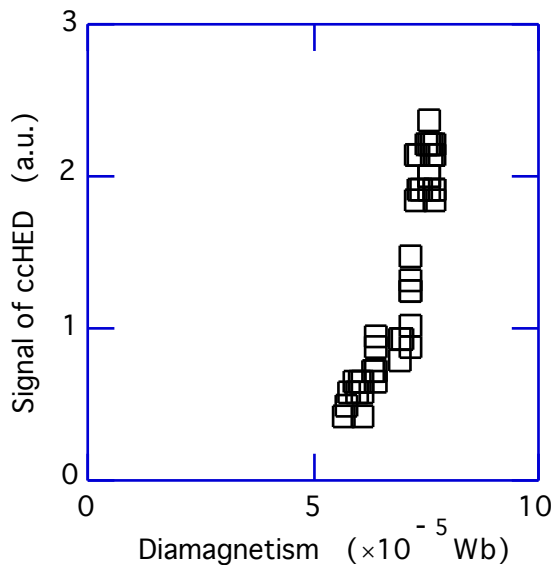


図13 高エネルギーイオン信号の反磁性量依存性

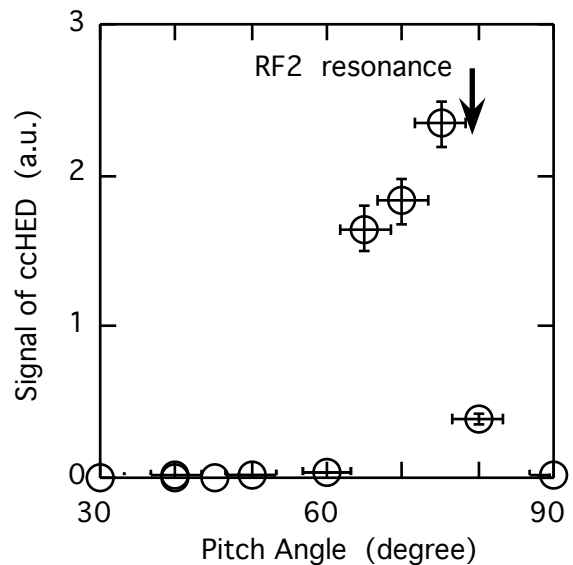


図14 セントラル部捕捉イオンのピッチ角分布

次に、測定された高エネルギーイオンの挙動とAIC波動との相関について調べた。参考文献[13]に述べられているように、エンド部に設置したeeHEDでは、セントラル部で生成された50keVを超す高エネルギーイオンが、古典的衝突時間に比べて十分に短い時間で端部に損失されることが観測されている。エンド部で計測される高エネルギーイオンの強度とセントラル部反磁性量及びセントラル部で観測されるAIC波動強度との関係を調べた。図15(a)に示すように、反磁性量の上昇との相関は弱く、図15(b)に示すように、AIC波動強度との相関が強く観測される。このことは、セントラル部で捕捉されていた高エネルギーイオンがAIC波動励起によりエンド部に散乱されてくることを示している。

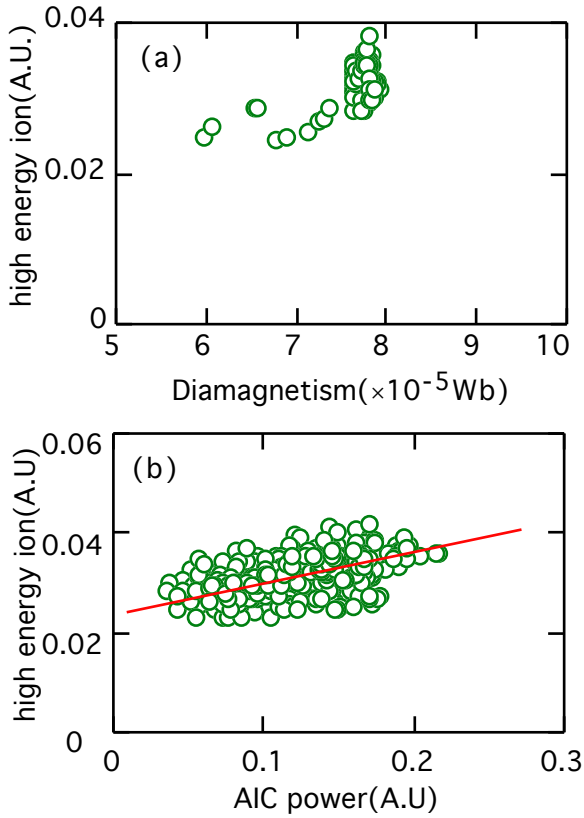


図15 高エネルギーイオン信号の(a)反磁性量、(b)AIC波動強度依存性

強いイオン加熱によりAIC波動が励起される条件での、eeHEDによるエンド部で観測される損失イオンの信号とccHEDによるセントラル部に捕捉されている高エネルギーイオン信号を比較したものが図16である。加熱が進み、高エネルギーイオンが生成されるにつれて、信号強度が増大するが、図15で示したように、エンド部損失イオンの信号強度は、励起されるAIC波動強度と同じ振舞をするが、捕捉イオンに関しては、ある時間帯から信号強度が減少を始めることがわかる。セントラル部内の捕捉イオンの振舞を詳細に調べるために、ccHED信号の時間的振舞のピッチ角分布依存性を計測した。図17に示すように、ピッチ角が小さくなる

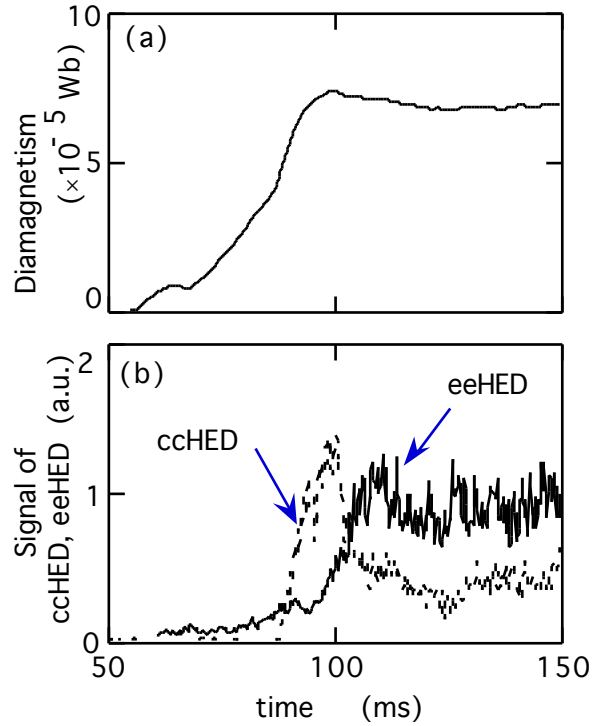


図16 (a)セントラル部反磁性量、(b)ccHED及びeeHED信号の時間変化

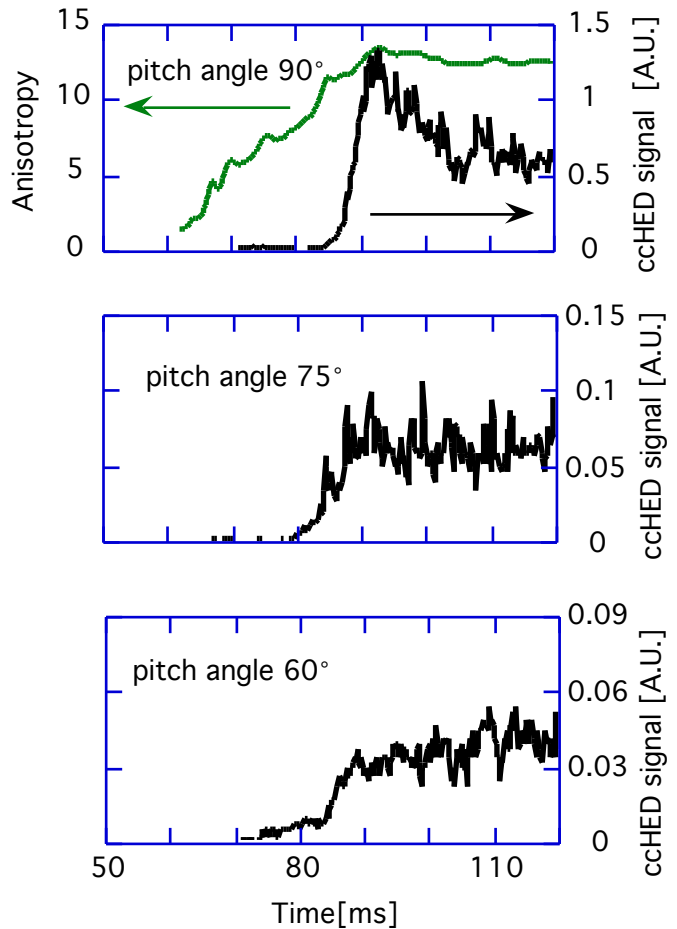


図17 ccHED信号時間変化のピッチ角依存性

と、ピークに達してからの減少がなくなり、エンドで観測されるeeHED信号及びAIC波動強度の時間変化に近づくことが明らかとなった。セントラル部で観測される高エネルギーイオンのピッチ角分布を含めた各パラメタの時間変化の特徴から、以下のことを議論することができる。反磁性量が上昇している時間帯において、高エネルギーイオン信号のピークに達する時刻は、ピッチ角が小さいほど早い。このことは、時間と共にピッチ角の大きい粒子の数が相対的に増大する事を示しており、加熱による非等方性の増大を表している。信号が時間的にピークに達する時、反磁性量の値をピッチ角に対してプロットしたものが図18である。ピッチ角が大きいほど反磁性量が大きい時刻でピークに達することが示されている。また、ピーク値とピークに達した後5msecの値との比率をプロットしたものが図19である。ピッチ角が大きいほどAIC波動励起による減少率が大きいことが示されている。波動による散乱により非等方性が減少する事を表している。

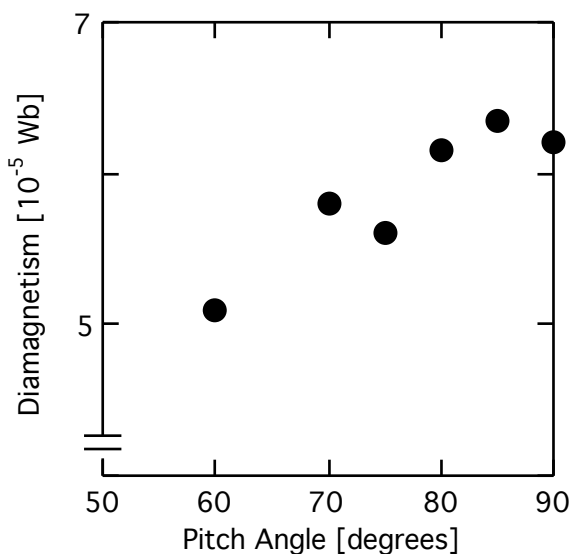


図18 各ピッチ角での信号がピークに達する時の反磁性量

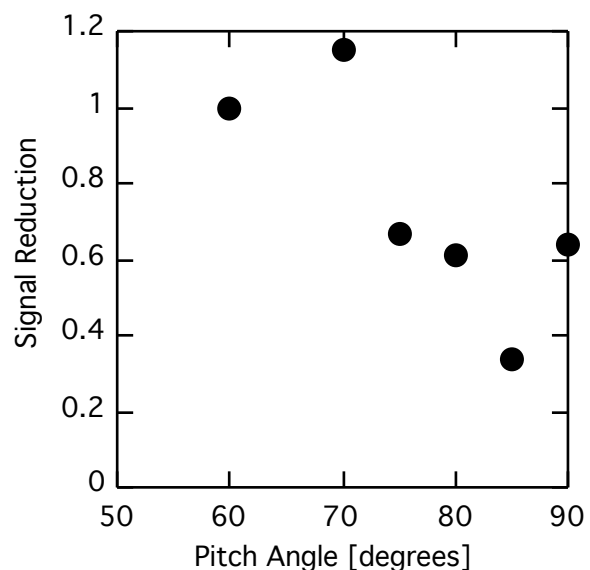


図19 ピーク値とピークに達した後5msecでの値との比率

5. まとめ

高温プラズマ中に自発的に励起されるアルベン波動は、高エネルギーイオンの損失を引起す等、プラズマ閉じ込めに大きな影響を及ぼす可能性が示唆されている。本課題では、GAMMA10タンデムミラー装置で観測されるアルベンイオンサイクロトロン波動(AIC)と高エネルギーイオンの振舞について、詳細な実験的研究を行った。

GAMMA10セントラル部においては、ICRF加熱に伴い、温度の非等方性に起因した不安定モードであるAIC波動が自発的に励起される。しかしながら、GAMMA10におけるこの波動は、既存の理論で予想されるより一桁近く小さなパラメタ領域で観測されており、その励起機構については明らかとなっていない。励起機構解明を主眼において、AIC波動の空間的構造の詳細測定を行った結果、プラズマのベータ値で決る軸方向境界条件を満たす固有モードあり、境界の内側では定在波として強く励起され、その外側では、軸方向に伝搬していることが明らかとなった。理論的解析を含めて、波動の反射やモード変換等との対応が今後の課題として残されている。

上記に述べたAIC波動の理論は、無限一様プラズマ中の解析であり、実験条件と異なることは明らかである。しかし、一般的には非一様性の効果は、むしろ不安定波動を安定化する方向に働くことが予想されるので、その差を説明することはできない。本課題では、セントラル部と同じく高ベータ、強い非等方性を持つアンカー部では、AIC波動が観測されないことに着目した。アンカー部は、極小磁場配位であること、軸方向の磁場強度変化が急峻であることなど、セントラル部と比べてその境界条件が大きく異なることが予想される。外部より印加する高周波に対するアンカー部プラズマの応答を調べるため、低電力のICRF入射系を製作し、AIC波動の周波数領域での入射実験を行った。その結果、AIC波動が正の成長率を持つ周波数帯で波動の励起効率を表すアンテナ負荷が減少することが観測された。また、磁気プローブでは、共鳴的な磁場揺動の励起が検出され、外部から電力を供給することにより、AIC波動を励起できることが確認された。セントラル部とアンカー部における境界条件の違いがAIC波動の自発励起に強く関与する可能性が示唆された。

本課題の主たるテーマである高エネルギーイオンとの相互作用に関しては、半導体検出器を用いた計測器を新たに製作した。これまで観測されていた、開放端部への50keVを超す高エネルギーイオンの損失に加えて、その時間変化の詳細な測定、及び、セントラル部に捕捉されているイオンのピッチ角分布の測定を行った。加熱に伴って、ピッチ角の大きなイオンが生成されていくが、AIC波動励起により、ピッチ角散乱を受け減少することが観測された。ピッチ角の小さなイオン信号は、エンド部で観測される端損失イオン信号と同じく、AIC波動強度と同じ振舞をする。ICRF加熱に伴う速度空間での非等方性の増大とAIC波動励起によるピッチ角散乱が競合した分布になることが明らかとなった。

本課題で取り上げたAIC波動、及び、AIC波動と高エネルギーイオンの相互作用に関しては、実験室プラズマよりもむしろ宇宙プラズマにおける理論、実験が多く報告されている。ミラー磁場配位は、タンデムミラーばかりでなく、トロイダル系の閉じ込め装置、宇宙プラズマにおいても共通の磁場配位である。さらに、本課題を実施する過程において、数百kHzの低周波数領域にもプラズマ圧力上昇に伴う磁場揺動の励起が観測されている[添付資料2]。トロイダル装置で最近注目を集めている、グローバルアルペン波動との関連や高エネルギーイオンに及ぼす影響について、また、宇宙プラズマ現象との関連を含めて更に研究を進展させてゆく予定である。

謝辞

本課題を遂行するにあたり、ご協力頂きましたGAMMA10グループの皆様に感謝致します。AIC波動の実験、計測、計算等でご助力頂きました東北大学・犬竹正明先生、九州大学・間瀬淳先生、筑波大学プラズマ研究センター・北條仁士先生、また、波動励起に関して理論面からご助言を頂きました核融合科学研究所・渡辺二太先生に心より感謝致します。実際の現場では、ICRFグループの大学院生、学類4年生とともに実験が遂行されてきました。ここに感謝致します。

参考文献

- [1] E.Scharer and A.W.Trivelpiece, Phys. Fluids **10**, 591 (1967).
- [2] C.Davidson and J.M.Ogden, Phys. Fluids **18**, 1045 (1975).
- [3] T.Tajima, K.Mima and J.M.Dawson, Phys. Rev. Lett. **25**, 201 (1977).
- [4] T.D.Rognlien and D.C.Watson, Phys. Fluids **22**, 1958 (1979).
- [5] T.Tajima and K.Mima, Phys. Fluids **23**, 577 (1980).
- [6] G.R.Smith, Phys. Fluids **27**, 1499 (1984).
- [7] M.Tanaka, J. Geophys. Res. **90**, 6459 (1985).
- [8] T.Tsang and G.R.Smith, Phys. Fluids **30**, 1362 (1987).
- [9] T.A.Casper and G.R.Smith, Phys. Rev. Lett. **48**, 1015 (1982).
- [10] S.N.Golovato, et al., Phys. Fluids **B1**, 851 (1989).
- [11] M.Ichimura, et al., Plasma Phys. Controlled Nucl. Fusion **34**, 1889 (1992).
- [12] M.Ichimura, et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 2734 (1993).
- [13] R.Katsumata, et al., Phys. Plasmas **3**, 4489 (1996).
- [14] T.Saito, et al., Rev. Sci. Instrum. **68**, 1433 (1997).