

平成21年 5月29日現在

研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19540524
 研究課題名（和文） 低域混成波キャビトンと粒子加速現象
 研究課題名（英文） Generation of Lower-Hybrid Cavitons and Particle Acceleration in a Laboratory Plasma
 研究代表者
 谷川 隆夫（TANIKAWA, TAKAO）
 東海大学・総合科学技術研究所・教授
 研究者番号：70207174

研究成果の概要： 磁化プラズマ中に生じる波動の1つである低域混成波が局所的に密度の低い窪み（と言っても磁力線方向に長く、磁場と直角方向に局在しているのだが）内に捕捉された形の“非線形”プラズマ波動が“低域混成波キャビトン”である。スペース・プラズマ中で重要な役割を果たしていると考えられている。これを世界で始めて自発的に実験室プラズマ中に発生させることに成功した。さらに、低域混成波キャビトンによるプラズマ粒子の加速現象の徴候を観測した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード： プラズマ物理、プラズマ波動現象、スペース・プラズマ、低域混成波、非線形プラズマ波動、キャビトン、ヘリコン・プラズマ、粒子加速現象

1. 研究開始当初の背景

(1) 低域混成波キャビトンとは

大振幅低域混成波が密度キャビティ（このキャビティは、磁場と直角方向には局在化しているが、磁力線方向には非常に長い、従って、管のような形状である）に捕捉されて局在化した非線形波動が“低域混成波キャビトン”である。局在化波動と密度キャビティが一体となっているところが特徴である。以下では“LH キャビトン”と略記する。LH キ

ャビトンの重要な特徴は、波動電場が主にバックグラウンド磁場と垂直方向であり、イオンは本質的に磁化されていないため（一方、電子は運動を磁力線方向にタイトに拘束されている）、イオンのクロス・フィールド加速が可能なことである。しかも、波動の局在性故に非常に強いイオン加速源と成り得る。外部励起源の作用により、数多くの LH キャビトンが時間的、空間的にランダムに生成・消滅を繰り返すような状態が生じれば、そのような状態は磁場がない場合の“強いラング

ミュー乱流（又はキャビトン乱流）[安藤，飽本，谷川，プラ・核学会誌 **81**, 94 (2005)] に比せられ得るもので“強い”低域混成波乱流とでも言えるであろう。このような“キャビテーション”が核融合プラズマをはじめ様々なプラズマ中で生じている可能性が高い。にも拘らず、LH キャビトンに関する研究は殆ど未踏の領域である。

(2) スペースにおける低域混成波キャビトン

特にオーロラ域の電離層内で、ロケットや衛星による観測から LH キャビトンと考えられるデータが得られている [H.L. Pécseli *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **39**, A227 (1997)]. LH キャビトンの発生に呼応してイオンがクロス・フィールド方向に強く加速される現象もロケット実験で観測されている [P.M. Kintner *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2448 (1992)]. 生成メカニズムが良く理解されていないため、スペースの分野では強い密度変調を伴う局在化した低域混成波を Lower-Hybrid Solitary Structure (LHSS) と呼ぶのが普通である。我々の言う LH キャビトンと同種のものと考えられる。発生メカニズムとしては次の3種類が提案された。

- ① LHSS として観測される低域混成波は観測領域外で何らかの原因で発生したものが、バックグラウンド・プラズマ中に既に存在する密度キャビティ内に共鳴的に捉えられたものである [P.W. Schuck *et al.*, *J. Geophys. Res.* **103** (A4), 6935 (1998)].
- ② 観測領域で何らかの原因で発生した低域混成波が変調不安定性などを通して大振幅化し、大振幅波に特有の非線形力（ポンデロモータイブ力と呼ばれる）の効果で密度キャビティを生成し、波動はその中に捕捉され LH キャビトンとなった [V.D. Shapiro *et al.*, *Phys. Plasmas* **2**, 516 (1995); D. Üçer and V.D. Shapiro, *Phys. Lett. A* **328**, 196 (2004)].
- ③ 局在化した低域混成波により加速されたイオンはラーマー半径が大きく局在化した波動の周りを回転運動することになる。一方、低温のイオンは局在化波動の周辺に停滞する。そのため波動部分の密度が低くなり密度キャビティを生成する。従って、密度キャビティの磁力線を横切る方向の幅はイオンのラーマー半径程度となる [D.J. Knudsen *et al.*, *J. Geophys. Res.* **109** A04212 (2004)].

本研究課題申請時では、LH キャビトンを実験室プラズマ中で自発的に発生させた例はなく、LH キャビトンとスペース・プラズマ中で観測される LHSS との関係は余りよく理解されていなかった。また、LH キャビトンが関係する粒子加速現象についても殆ど解明されていなかった。

2. 研究の目的

研究代表者らが開発してきた高性能の新型ヘリコン・プラズマ装置を駆使して、実験室プラズマ中に LH キャビトン制御された形で生成し、個々のキャビトンの性質を調べることが申請時における研究の主目的であった。特に、LH キャビトンによる粒子加速現象、LH キャビトンの生成メカニズムについて実験的に調べることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

実験には Tokai Helicon Device (THD) を主に用いた (図 1 (a) を参照)。この装置の主真空容器のサイズは、内径 20 cm、長さ 1 m である。左側 3 つのコイルと右側 6 つのコイルは別々の電源につながれており、真空容器左端のクウォーツガラス窓に殆ど接するように大気中に設置された励起アンテナ周辺

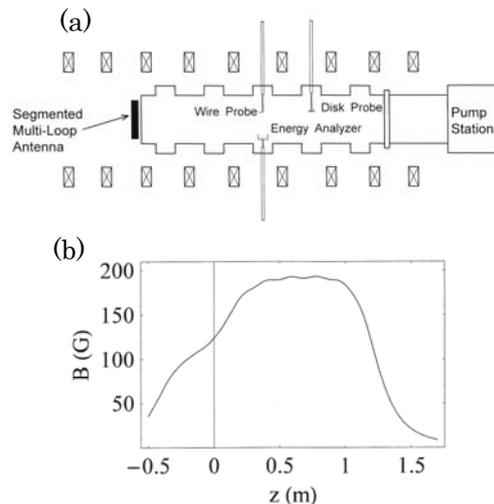


図 1. (a) Tokai Helicon Device (THD) の概略図. (b) 中心軸上の磁場プロファイル. アンテナに接するクウォーツガラス窓の真空側が $z = 0$ cm に相当する。



図 2. THD で使われている分割型多ループアンテナの写真。

の磁場配位を調節可能である。磁場の軸方向プロフィールの一例を図 1 (b) に示す。励起アンテナは本研究のために特にデザインされたものであり、フラット型で、4つの同心円状のループが更に幾つかのセグメントに分割されたアンテナである (図 2 を参照)。このアンテナを放電及び波動励起用双方に使用した。

本研究では、一部の実験で、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA) スペース・プラズマ共同研究設備に設置されている Large Helicon-Plasma Device (LHPD) も使用した。この装置は本研究代表者及び研究分担者の考案によるものである [S. Shinohara and T. Tanikawa, Rev. Sci. Instrum. **75**, 1941 (2004); Phys. Plasmas **12**, 044502 (2005); T. Tanikawa and S. Shinohara, Thin Solid Films **506-507**, 559 (2006)]。LHPD 内に生成されたプラズマの写真を図 3 に示す。



図 3. LHPD 内に生成された高密度アルゴンプラズマ。

(2) 実験方法の概略

THD の実験では、rf 放電は放電パルス長約 10 ms で 1 Hz から 10 Hz 程度の繰り返し周波数でパルス放電された。アフターグロー・プラズマ中に波動励起用の非常に短い (5 μ s 程度) rf パルスを入射した。実験のパルスシーケンスを図 4 に示す。放電、波動励起双方のパルスについて同じ増幅器、整合器を使用したので、放電用及び波動励起用ともに同じ周波数 (通常 7 MHz) を使った。

励起された低域混成波動の相対電場測定及びプラズマ密度測定には直径 0.52 mm、長さ 10 mm のワイヤプローブ (セミ・リジッド同軸ケーブルの中心導体を使用) を用いた。磁力線方向に加速される電子の検出には 5 mm 径のディスクプローブ、クロス・フィールドに加速されるイオンの検出には真空容器側壁付近に設置されたエネルギー・アナライザーを使用した (図 1 (a) を参照のこと)。

LHPD 使用の実験の具体的実験方法については、実験装置の項で挙げた文献に詳しく述べられているので、そちらを参照願いたい。

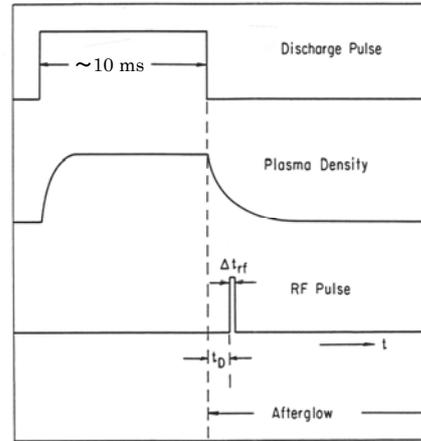


図 4. 実験パルスのタイミング。

4. 研究成果

(1) 低域混成波キャビトンの生成

Tokai Helicon Device (THD) 内に生成したプラズマ中に LH キャビトンを生発的に発生させることに世界で始めて成功した。真空容器端に設置された分割型多ループアンテナを用い LH 周波数域の短い (約 20 周期) rf パルスをアフターグロー・プラズマ中に入射し、径方向密度分布の非一様性を利用して共鳴層に大振幅 LH 波を励起させることができる。これが密度変調を誘起し、LH キャビトンへと発展する。波動励起用 rf パルスのあるなしで密度プロフィールにどのような変化が生じるかの一例を以下に示す。波動励起用 rf パルスのアフターグロー・プラズマ中での遅延時間 t_0 を変えて行くと、強い密度変調が生じる t_0 がある (図 5 を参照のこと)。共鳴層に出会ったためであると解釈できる。この時の径方向密度プロフィールの rf パルスのあるなしによる違いを図 6 に示す。rf パルスを入射した場合、 $r = 3$ cm から 6 cm にわたり密度が rf パルスなしの場合と比べて低くなっていることが分かる。この図からは僅かな窪みができた程度にしか見えないが、バックグラウンドの密度プロフィールを調節することでよりクリアな LH キャビトンの生成が可能である。

(2) キャビティ固有モードの同定

図 6 から分かるように、中心部分が低密度のホロー状密度分布を持つプラズマを生成可能である。波動励起用 rf パルスにより、この予め用意されたキャビティ内にこのキャビティ特有の定在波化した固有モードを励起可能である。実際、図 6 の励起波動振幅の径方向プロフィールはそのような固有モードの存在を示唆している。項目 (1) の結果と合わせると、LH キャビトンの基本的な生成過

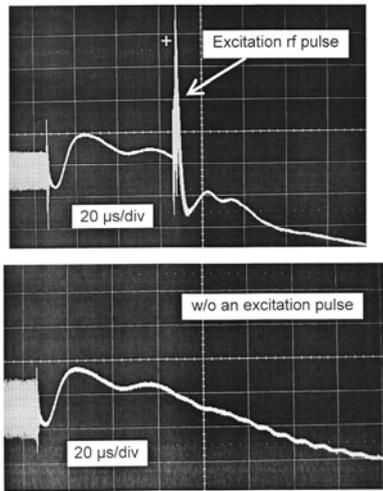


図 5. LH キャビトンの励起. イオン飽和電流の時間依存性. 上図で、 $\Delta t_{rf} = 5 \mu s$, $P_{rf} \approx 740 W$.

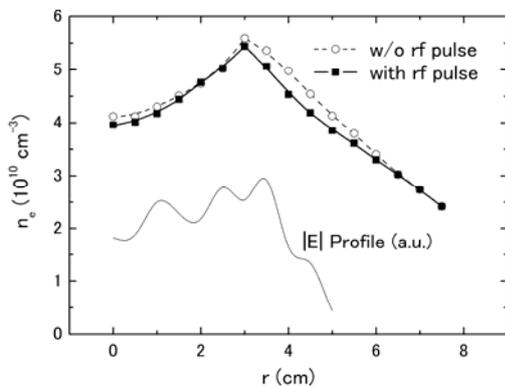


図 6. LH キャビトンの励起例. 径方向密度プロファイルと励起波動振幅の径方向プロファイル. 実験条件は図 5 と同じ.

程、固有モードの存在が実験的に検証されたことになる。現在研究期間内に終了できなかった詳しいデータ解析を続行中である。

(3) 粒子加速現象

LH キャビトンの発生に伴い、真空容器壁近くに設置されたエネルギー・アナライザーがイオンのクロス・フィールド加速と解釈できる高速イオン成分を検出している。同時に、電子が磁力線方向に加速された徴候も検出された。検証実験を続行中であり、今後詳細を発表して行く予定である。

(4) ISAS/JAXA の Large Helicon-Plasma Device 利用の実験における新たな発展

LHPD に可動終端電極を設置し、実効的プラズマ長を可変にして実験を実施し、プラズマ長、密度プロファイルなどに依存する定在波の軸方向固有モードを持つヘリコン波が励起されることを見出した。この現象を利用すると、外部パラメータの調節によりプラズマ密度分布を精度よく制御できる。ヘリコン

波自体のモード変換による LH 波への遷移現象と合わせ利用することで、LH キャビトン固有モードの高精度検証実験への新たな道が開けた。

以上のような実験研究は国内外で実施例がなく、ユニークな成果である。スペース・プラズマで観測される現象の正しい理解に貢献できると考える。プラズマ基礎物理の分野などにも我々の成果は今後インパクトを与えることになると思われる。加速現象については、磨耗電極を持たない先進的電気推進ロケットエンジンなどへの応用も視野に入れ今後研究を発展させて行く計画である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① 谷川隆夫、篠原俊二郎，“低域混成波キャビトンの生成と粒子加速”，スペース・プラズマ研究会 論文集，平成 20 年度，印刷中 (2009)，査読無。
- ② T. Motomura, K. Tanaka, S. Shinohara, T. Tanikawa, and K.P. Shamrai, “Characteristics of Large Diameter, High-Density Helicon Plasma with Short Axial Length Using a Flat Spiral Antenna”, JPFR Series, in press (2009), 査読有。
- ③ S. Shinohara, T. Hada, T. Motomura, K. Tanaka, T. Tanikawa, K. Toki, Y. Tanaka, and K.P. Shamrai, “Development of High-Density Helicon Plasma Sources and Their Applications”, Physics of Plasmas, Vol. 16, 057104-1 – 057104-10 (2009), 査読有。
- ④ T. Motomura, K. Tanaka, S. Shinohara, and T. Tanikawa, “Production of Large Diameter, High-Density Helicon Plasma with Short Axial Length Using a Flat Spiral Antenna”, Engineering Sciences Reports, Kyushu University, Vol. 30, 29 – 31 (2008), 査読有。
- ⑤ 本村大成、田中謙次、篠原俊二郎、谷川隆夫、船木一幸，“スパイラルアンテナによる短軸長の大口徑・高密度ヘリコンプラズマの励起波動特性”，スペース・プラズマ研究会 論文集，平成 19 年度，103 – 106 (2008)，査読無。
- ⑥ 谷川隆夫、篠原俊二郎、船木一幸、山際啓一郎，“宇宙研における大容量 - 高密度ヘリコンプラズマ実験の概要”，JAXA Special Publication, JAXA-SP-06-016, 30 – 34 (2007)，査読無。
- ⑦ 谷川隆夫、山際啓一郎、船木一幸、佐藤

杉弥、篠原俊二郎, “宇宙研磁化プラズマ装置で生成した比較的プラズマ長の短い大口径ヘリコンプラズマの特性”, スペース・プラズマ研究会 論文集”, 92 - 95 (2007), 査読無.

- ⑧ S. Shinohara and S. Horii, “Initial Trial of Plasma Mass Separation by Crossed Electric and Magnetic Fields”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 7A, 4276 - 4281 (2007), 査読有.

[学会発表] (計 18 件)

- ① 本村大成, “スパイラルアンテナを用いた短軸長の大口径・高密度ヘリコンプラズマ特性 III”, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日, 立教大学 池袋キャンパス.
- ② 谷川隆夫, “低域混成波キャビトンの生成と粒子加速”, 平成 20 年度スペースプラズマ研究会, 2009 年 3 月 5 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.
- ③ 本村大成, “スパイラルアンテナによる短軸長の大口径・高密度ヘリコンプラズマの励起波動特性”, 平成 20 年度スペースプラズマ研究会, 2009 年 3 月 5 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.
- ④ 本村大成, “大口径・短軸長ヘリコンプラズマの励起波動特性”, プラズマ・核融合学会 九州・沖縄・山口支部第 12 回支部大会, 2008 年 12 月 22 日, 九州大学 筑紫地区.
- ⑤ 谷川隆夫, “スペースプラズマ現象の実験室シミュレーション”, 宇宙関連プラズマ研究会 2008, 2008 年 12 月 16 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.
- ⑥ 本村大成, “スパイラルアンテナにより生成される大口径・短軸長高密度ヘリコンプラズマ特性 II - スペース・プラズマ実験と応用に向けて -”, 宇宙関連プラズマ研究会 2008, 2008 年 12 月 16 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.
- ⑦ 本村大成, “大口径・短軸長ヘリコンプラズマの励起波動特性”, 第 25 回プラズマ・核融合学会年会, 2008 年 12 月 4 日, 栃木県 総合文化センター.
- ⑧ Takao Tanikawa, “Characteristics of Helicon-Plasma Produced Using a Segmented Multi-Loop Antenna II”, the 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics of the American Physical Society, 2008 年 11 月 19 日, Dallas, Texas, U.S.A.
- ⑨ Taisei Motomura, “Wave Characteristics of Large-Diameter, High-Density Helicon Plasma with Short Axial Length”, the 50th Annual Meeting of

the Division of Plasma Physics of the American Physical Society, 2008 年 11 月 19 日, Dallas, Texas, U.S.A.

- ⑩ Taisei Motomura, “Characteristics of Low Aspect Ratio, High-Density Helicon Plasma with Large Diameter”, the 10th Cross Straits Symposium at Kyushu University, 2008 年 11 月 13 日, Chikushi Campus, Kyushu University.
- ⑪ 本村大成, “スパイラルアンテナを用いた短軸長の大口径・高密度ヘリコンプラズマ特性 II”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 岩手大学 上田キャンパス.
- ⑫ Takao Tanikawa, “Characterization of a New Helicon Plasma Source with a Segmented Multi-Loop Antenna”, the Fourteenth International Congress on Plasma Physics, 2008 年 9 月 10 日, Fukuoka International Congress Center.
- ⑬ Taisei Motomura, “Characteristics of Large Diameter, High-Density Helicon Plasma with Short Axial Length Using a Flat Spiral Antenna”, the Fourteenth International Congress on Plasma Physics, 2008 年 9 月 10 日, Fukuoka International Congress Center.
- ⑭ Takao Tanikawa, “Lower-Hybrid Caviton Experiments Using Helicon-Type rf Plasmas”, XXIX General Assembly of International Union of Radio Science, 2008 年 8 月 14 日, Chicago, Illinois, U.S.A.
- ⑮ 本村大成, “スパイラルアンテナを用いた短軸長の大口径・高密度ヘリコンプラズマ特性”, 日本物理学会 第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 25 日, 近畿大学 本部キャンパス.
- ⑯ 本村大成, “スパイラルアンテナにより生成される大口径・短軸長高密度ヘリコンプラズマ特性 - スペース・プラズマのシミュレーション実験に向けて -”, 宇宙関連プラズマ研究会 2007, 2007 年 12 月 19 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.
- ⑰ 本村大成, “スパイラルアンテナによる大口径・短軸長の高密度ヘリコンプラズマ特性”, 応用物理学会九州支部シンポジウム, 2007 年 11 月 8 日, 九州大学 筑紫地区.
- ⑱ Takao Tanikawa, “New RF Helicon-Plasma Devices for Various Applications”, Asia-Pacific Meeting on Frontiers in Plasma Science, 2007 年 11 月 1 日, Swissotel Merchant Court, Singapore.

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.rist.u-tokai.ac.jp/danwa/
2007index.html](http://www.rist.u-tokai.ac.jp/danwa/2007index.html)

[http://zone.aees.kyushu-u.ac.jp/~sinohara/
Homepage/shinohara.html](http://zone.aees.kyushu-u.ac.jp/~sinohara/Homepage/shinohara.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷川 隆夫 (TANIKAWA, TAKAO)
東海大学・総合科学技術研究所・教授
研究者番号：70207174

(2) 研究分担者

篠原 俊二郎
(SHINOHARA, SHUNJIRO)
九州大学・総合理工学研究院・准教授
研究者番号：10134446