

# 日本物理学会誌

- ヘリコンプラズマ源の開発と応用
- 不均一超伝導体におけるクーパー対の新たな対称性

**BUTSURI**

第64巻 第7号(通巻 707号) ISSN 0029-0181

昭和30年 6月13日 第3種郵便物認可

平成21年 7月 5日発行 毎月5日発行

**2009 VOL. 64 NO.**

7



解説	ヘリコンプラズマ源の開発と応用—広域プラズマ科学への展開	篠原俊二郎 519
	不均一超伝導体におけるクーパー対の新たな対称性	田仲由喜夫, 柏谷 聡 527
最近の研究から	RFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> の電荷秩序による強誘電性	池田 直 535
	電荷秩序による電気分極と電気磁気効果—新規な誘電体・層状鉄酸化物—	石原純夫, 那須譲治 540
	超高分解能原子・分子実時間イメージングへの挑戦	森下 亨 544
話題	KEKB・富士テストビームライン (FTBL)—Bファクトリーを活用した 高エネルギー検出器テストライン—	幅 淳二 550

JPSJの最近の注目論文から	Vol. 78 (2009) No. 4より	高山 一 553
学会報告	第64回年次大会シンポジウムの報告	領域委員会 555
シリーズ「物理教育は今」	小・中・高で印象に残る理科授業と理科教員がおかれている現実	

学界ニュース	恩賜賞・日本学士院賞: 江口 徹氏 フンボルト賞: 大栗博司氏	牛田憲行 566 加藤晃史 569
談話室	“最先端の物理を高校生にSAP” 温室ガス削減中期目標—策定から達成へ— 反物質研究者が見た「天使と悪魔」の虚と実	菅野浩明 569 細谷 裕 570 一丸節夫 571 早野龍五 573
新著紹介		574
会員の声	■科学倫理のケース・スタディ教育	576

掲示板	■人事公募 ■学術的会合 ■その他	577
行事予定		584

会告	■2009年秋季大会の宿泊・交通等の案内 ■大会の宿泊手配業務等の業者依頼について (お知らせ) ■2009年秋季大会会場における託児室の設置について ■2009年秋季大会核物理関係参加登録費について ■日本物理学会2009年秋季大会の事前参加登録・事前講演概要集購入申込のご案内 ■2009年度日本物理学会科学セミナー「環境・エネルギー問題へ発信する基礎科学」 ■第50回(平成21年度)東レ科学技術賞, 同・東レ科学技術研究助成, 第41回内藤記念科学振興賞, 2010年度女性科学者に明るい未来をの会「猿橋賞」及び第2回(平成21年度)中谷賞の各受賞(研究助成は受領)候補者の推薦(賞は他薦, 研究助成はご本人の申請)について(募集) ■2009年5月1日付新入会者	587
----	--	-----

本会関係欧文誌予定目次		593
-------------	--	-----

表紙の説明 高密度ヘリコンプラズマ光: (左上から斜めに右下へ) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)・宇宙科学研究本部 (ISAS) 共同利用設備での, 密度分布制御した太さの違う世界最大容量アルゴンプラズマ (2枚), 水素プラズマ (これらの3枚はアンテナ側からの撮影で遠方が細く見える), ヘリウムプラズマ (これと左下の写真はスパイラルアンテナが見える方向への撮影), (左下) 同 ISAS のアルゴンプラズマとスパラルアンテナ (プラズマ中心付近が青白い, 高密度ヘリコンモードのシンボルであるいわゆるブルーモード), (中央上から斜めに右中へ) 東京農工大学のプラズマ生成とプラズマ推進 (ロケット) 用の小容量アルゴンプラズマ (故都木恭一郎氏による), 九州大学の強磁場装置のアルゴンプラズマと直線磁場装置のネオンプラズマ (詳細は本号に掲載されている篠原俊二郎氏の「解説」の記事を参考のこと.)



**Reviews**

- Development and Application of Helicon Plasma Sources—Evolution of Extensive Plasma Science* Shunjiro Shinohara 519
- New Type of Cooper Pair in Non-Uniform Superconducting System* Yukio Tanaka and Satoshi Kashiwaya 527

**Current Topics**

- Electronic Ferroelectrics in  $RFe_2O_4$ —Discovery of Polar Electronic Ordering—* Naoshi Ikeda 535
- Electronic Charge Order and Electric Polarization—Novel Dielectrics Layered Iron Oxide—* Sumio Ishihara and Jyoji Nasu 540
- Real Time Atomic and Molecular Imaging with Ultra-High Resolution* Toru Morishita 544
- KEKB·Fuji Test Beam Line (FTBL)* Junji Haba 550

**JPSJ Selected Papers in the Latest Issue**

Hajime Takayama 553

**Report on JPS Meeting**

- Report on Symposiums in The 64th Annual Meeting* Division Committee 555

**Physics Education Today**

- Impressed Science Lessons in School and Current Situation of Teachers* Noriyuki Ushida 566

**Physics Community News**

- Imperial Prize·Japan Academy Prize: Professor Tohru Eguchi* 569
- The Humboldt Prize: Prof. Hiroshi Ooguri* 569

**Forum**

- “Frontier Physics for High School Students—SAP”* Yutaka Hosotani 570
- On Shorter-Term Reduction in Atmospheric Greenhouse Gases* Setsuo Ichimaru 571
- Antimatter Researcher Comments on Fact vs Fiction of “Angels and Demons”* Ryugo Hayano 573

**Book Reviews**

574

**Letters and Comments**

576

**Notice Board**

577

**JPS Announcements**

587

# ヘリコンプラズマ源の開発と応用—広域プラズマ科学への展開

篠原俊二郎 (九州大学大学院総合理工学研究院 816-8580 春日市春日公園 6-1 e-mail: sinohara@aees.kyushu-u.ac.jp)

プラズマ科学の進展は目覚ましく、それを支えるプラズマ源は重要である。ヘリコンプラズマ源は、幅広い外部制御パラメータで容易に高電離(数10%以上)・高密度( $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 以上)のプラズマが得られるため、基礎プラズマ、プロセスプラズマ、核融合、ガスレーザー、宇宙プラズマモデリング、プラズマ加速/推進等、種々のプラズマ源として広く用いられている。しかし一方興味深い波動現象と高効率生成の物理機構の更なる理解が求められ、ヘリコン源の特性を生かした応用研究はまだ途上にある。本稿では、生成機構の解明研究の進展、及び特徴あるヘリコンプラズマ源開発とその活用による今後の広域プラズマ科学への展開について概説する。

## 1. はじめに

プラズマは宇宙から地上まで様々な形で存在し、プラズマ科学の発展により光、熱、電気、力学、化学反応、核反応を利用して先進利用され、核融合、半導体製造をはじめとしてエネルギー、ナノテク/材料、情報/通信、環境、宇宙、バイオ等広範な分野に爆発的に展開し、人類の生活に必須なものとなっている。例えば身近なものでは、プラズマテレビやパーソナルコンピュータ製造過程でも大きく貢献している。ここで何れの分野においても、それに適したプラズマ源開発は不可欠であり多様な研究が進展している。その中で、ヘリコン波(Helicon Wave)を用いたヘリコンプラズマ源<sup>2,7)</sup>では、他のプラズマ源より幅広い外部制御パラメータ領域(例えば磁場、ガス圧力、周波数等)で、高電離(数10%以上)で高密度( $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 以上)のプラズマを、高周波パワーがkWレベルで容易に得られる。また容器内の電極間放電と異なり、励起アンテナが真空容器外にあるためプラズマとの直接相互作用がなく、不純物が少なく長寿命でかつプラズマ内に直流電流が流れない(そのため電流による不安定性が生じにくい)のも特長である。これらの長所のため、基礎から応用研究まで広汎に種々の分野のプラズマ源として活用されている。なお、ヘリコン波は元々低温金属内を伝わる波に命名されたが、その現象と基本的に類似している。

さてヘリコンプラズマ生成は、この幅広い運転領域で波動現象を利用して行う。典型的には数10Gのオーダーから1kG程度までの印加磁場、0.1Paから数Paでのガス圧力(ガス種は様々)で、印加周波数は主に数MHzから数10MHz位の高周波領域(電源も安価)であり、電子サイクロトロン周波数( $f_{ce} = \omega_{ce}/2\pi = eB/2\pi m_e$ )とイオンサイクロトロン周波数( $f_{ci} = \omega_{ci}/2\pi = eB/2\pi m_i$ )領域の間にある( $e$ : 電荷素量,  $B$ : 磁場,  $m_e$ : 電子質量,  $m_i$ : イオン質量)。この領域の波動でポピュラーな波の一つとしてホイッスラー波<sup>8)</sup>があり、例えば極地で落雷現象が起こった場合に地磁気の磁力線に沿って伝わる可聴周波数帯の右回りの円偏波の電磁波として知られている。実験では円柱状の金属や絶縁体の容器内にプラズマがあり、半径方向の端で境界条件があるため、ヘリコン波は境界のあるホイッスラー波と呼ばれ、電磁波と静電波の両方の性質を兼ね備えている

(境界があるため後述のように、偏波の自由度が増えたりモード変換にも寄与する)。

ヘリコン波研究は1960年代から回転磁界によるプラズマ生成研究から始まったが、本格的には1970年代からのボズウェル(Boswell)<sup>9)</sup>の研究が端緒となっている。その後ヘリコンの有用性が認識されることにより進展を続け、ヘリコンプラズマの波動現象や生成物理機構の解明、パラメータサーベイや新規ヘリコンプラズマ源開発、及び様々な応用に至るための特性解析が精力的に行われてきた。特に1990年代には爆発的な論文数の増加(年間50編以上)があり、2000年代に入ると一旦少し下がってまた50編程度を維持している。<sup>10)</sup> その間研究は波動や生成特性等のヘリコンプラズマの基礎物理研究から、その特長を生かした応用研究へと段々と変化している。その中でヘリコンプラズマ源の特性と高効率プラズマ生成を統一的に理解することが長年の懸案であり、またこのプラズマ源の他にない特長を如何に利用・拡張し、プラズマ科学とその領域外への広がり貢献していくかが課題であった。

本解説では、第2章でヘリコンプラズマの簡単な説明を波動現象と理解されつつある生成物理機構と共に説明し、第3章で切り開かれてきたヘリコンプラズマ源の数々の開発例とその特性、第4章でヘリコンプラズマ源を用いた広域プラズマ科学の展開例を示し、最後に第5章で新たな分野や視野を広げられるであろう今後の展望を述べる。

## 2. ヘリコン波プラズマとは?

高周波放電ではアンテナ等により電場を誘起し、電子を加速・加熱し中性ガスを電離させてプラズマを生成する。誘導性結合プラズマ(ICP: Inductively Coupled Plasma)<sup>2)</sup>の場合、プラズマは電気伝導度が高く外部高周波電場を消すため、プラズマ表面の $c/\omega_{pe}$ 程度の薄い層しかスキニング加熱ができない( $c$ : 光速,  $\omega_{pe}$ : 電子プラズマ角周波数で $\omega_{pe}^2 = n_e e^2 / m_e \epsilon_0$ ,  $n_e$ : 電子密度,  $\epsilon_0$ : 真空の誘電率)。それに対しヘリコン波は伝搬波動を利用するため、励起波動がプラズマ中に伝搬、吸収され全体のプラズマ領域での生成に寄与する。更に伝搬波動でも、例えば電子サイクロトロン共鳴<sup>2,8)</sup>を用いたプラズマ生成では磁場と励起周波数及び磁場配位に依存するため外部パラメータ制御領域が狭いが、



ヘリコン波では非共鳴の減衰機構等(後述)を用いるため運転領域が広く有利である。

ここでヘリコン波の分散関係(波数  $k$  と角周波数  $\omega$  との関係: これから波動伝搬現象がわかる)を求める。<sup>11)</sup> 円柱座標系で  $z$  軸方向に一様磁場  $B_0$  があり径・軸方向に一様密度分布の場合, 以下のマックスウェルの式と一般化されたオームの式を用いる。但し式(2)では位相速度( $\omega/k$ )が光速  $c$  より小さい条件を使って変位電流の項を省略し, 式(3)では周波数が高くイオンは動けず( $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$ ), 電流は電子のみ担う  $E \times B_0$  ドリフト<sup>8)</sup>運動であり, プラズマの抵抗(衝突項)は無視している。ここで  $E, B, J$  はそれぞれ高周波による電場, 磁場, 電流密度で,  $\exp[i(k_{\parallel}z + m\theta - \omega t)]$  の依存性を仮定( $k_{\parallel}$ : 磁場方向の波数,  $m$ : 周方向モードで整数)し,  $\mu_0$  は真空の透磁率である。

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (1)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 j \quad (2)$$

$$E = j \times B_0 / cn_e \quad (3)$$

式(1)-(3)を変形すると,  $\alpha = (\omega/k_{\parallel})(\omega_{pe}^2/\omega_{ce}c^2)$  を用いて以下となる。

$$\nabla \times B = \alpha B \quad (4)$$

これは逆転磁場ピンチ核融合研究装置での無力磁場による自己組織化された磁気流体力学的平衡配位<sup>12)</sup>(磁場と電流が平行方向のため電磁力がゼロ)や, 太陽表面での磁力線の繋ぎ換え(磁力線再結合)の理解に通じる(これらは理想電磁流体方程式で記述できるため式が同一)ものであり, 半径方向の解はベッセル関数(ヘリコン波では定在波)で表される。また分散関係は以下となる( $k_{\perp}$ : 磁場に垂直方向の波数)。

$$k_{\parallel}^2 + k_{\perp}^2 = \alpha^2 \quad (5)$$

これから印加周波数を  $f$ , プラズマ半径を  $a$  で表し,  $m=0$  の場合に得られる分散関係を図1に示す(ヘリコンプラズマ源設計の目安となる)。<sup>3)</sup> ここで  $k_{\perp}a$  はベッセル関数  $J_1$  の第  $j$  ゼロ点を示し,  $j=1$  の基本波を  $k_{\perp}$  とする。 $\alpha$  に比例する  $fn_e/B$  は  $k_{\parallel}$  と共に増え,  $k_{\parallel}$  が一定ならこの値は  $a$  が小さいほど大きい。この関係式とプラズマの閉じ込めや諸条件を考慮して設計する必要がある。また後述するように, 実験的には大体  $a$  が 3-10 cm, 周波数 7-30 MHz, 磁場 0.1-1 kG, 観測された磁場方向の波長 10-30 cm 程度が多い。

次に, 高効率の高密度プラズマ生成メカニズムについて述べる。実験的に異常に大きいパワー吸収現象があり長年(30年ほど)論争となってきたものである。候補として最初に考えられた衝突減衰(高周波波動電場による電子と中性粒子との衝突及びクーロン衝突で波動が減衰)<sup>11)</sup>では, かなり高密度にならないと効率が低く説明できなかった。その後提唱された減衰機構の候補を大別すると, 波と粒子

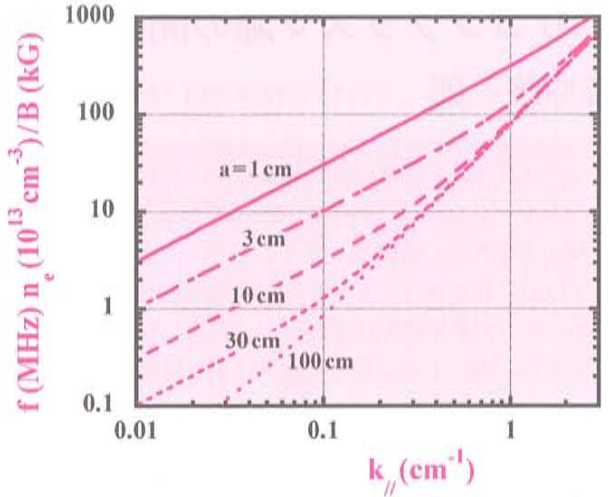


図1 半径  $a$  を変えた場合の一様密度分布での  $m=0$  ヘリコンモードの分散関係。

の相互作用による運動論(電子加速)と流体的メカニズム(後述のモード変換)が挙げられる。歴史的にはまず前者のメカニズムである線形や非線形ランダウ減衰<sup>8,11)</sup>が考えられた。ここでランダウ減衰は波と粒子との相互作用で起こり, 電子速度がヘリコン波の位相速度と同程度である必要がある。それには数 10 eV 以上の高エネルギーのテイル(バルクの電子温度は数 eV)が存在するかどうかが問題で, 種々の解析や計測が行われたが結局テイルが存在しても定量的には説明が困難である事がほぼ定説となった。<sup>10)</sup>

これは以下のエネルギーの観点からもわかる。<sup>13)</sup> 波動磁場, 波動電場のエネルギーをそれぞれ  $W_B, W_E$ , 粒子のエネルギーを  $T$  とすると,  $T = (k_T c / \omega_{pe})^2 W_B, W_E \sim T(\omega_{ce} / \omega_{pe})^2 \ll T$  と表される。 $k_T$  は  $k_{\parallel}$  と  $k_{\perp}$  のトータルの波数(絶対値)である。ヘリコン波では  $k_T c \ll \omega_{pe}$  のため  $W_B \gg T$  となり, 全エネルギー  $W_T (= W_B + T + W_E)$  の減衰を  $T$  の減少だけで説明するのは無理であると考えられる(なお最終的な粒子エネルギーの評価には, プラズマの閉じ込め時間の考慮も必要である)。そこで出てきたのは後者のメカニズムである, シャムライ(Shamrai)の提唱によるヘリコン波から TG 波(Trivelpiece-Gould 波: 静電波)モード変換による吸収過程である。<sup>13)</sup> この TG 波ではヘリコン波と異なり  $k_T c \gg \omega_{pe}$  であり,  $T \gg W_B$  となり電子の運動がほとんど  $W_T$  を担うため, 短波長のこの波の衝突減衰は大きく, 高効率プラズマ生成を説明できると考えられる。

ここで TG 波について説明する。ここまでヘリコン波の分散や性質について近似式を使って説明したが, 粒子温度ゼロにした冷たいプラズマで電子の慣性を無視しない解析では, 波数が大きいもの(位相速度  $\omega/k$  が遅いので遅進波: ここでは静電的性質を持つ TG 波)と, 小さいもの(位相速度が速い速進波: ここではヘリコン波)との2つの解が存在する。詳細は省略するが  $k_{\parallel}$  が一定の場合,  $k_{\perp}$  に関して4次方程式( $k_{\perp}^2$  に関しては2次方程式)となることからわかる。<sup>2,8)</sup> ここで  $\omega > \omega_{LH}$  (低域混成角周波数<sup>2,8)</sup>: 高密度



では  $\omega_{LH} \sim \omega_{ce} \cdot \omega_{ci}$  の場合、両波の分散曲線は繋がる（結合する）が、磁場が上昇し  $\omega < \omega_{LH}$  となる場合は繋がらない。図2(a)は横軸を実質的に密度（右が低く左の方が高い）、縦軸を  $k_{\perp}$  にして、半径が  $r_{up}$  で両波が繋がっている例である。逆に  $k_{\perp}$  を一定にして  $B_0 (> B_{LH})$  を変えて分散関係を  $k_{\parallel} - n_c$  空間で調べると、TG波は低密度でヘリコン波は高密度で伝搬する。なお、径・軸方向に一様密度分布で衝突項を入れた場合、この2つの波の満たす方程式<sup>11)</sup>は、式(4)の無力磁場配位（短波長と長波長の解となる2つの式）となり、高速流で高ベータ（プラズマ圧力と磁場圧力の比）平衡となる磁場と速度配位を記述するダブルベルトラム条件（渦と流れが平行の方程式が2つ）<sup>14)</sup>と同形である。

さて提唱されたこのモード変換のモデルには共鳴と非共鳴過程がある。<sup>13)</sup> 共鳴過程は図2(a)に示すように、密度が径方向に非一様な場合、ヘリコン波はTG波と径方向のある位置  $r_{up}$  で一致（共鳴）し、ヘリコン波からTG波へモード変換されTG波は強く減衰する。この  $r_{up}$  は  $k_{\parallel}$  により異なるので、実際にはプラズマ全体で変換が起こる。非共鳴過程は図2(b)に示すように、密度が一様な場合は境界で径方向の電流成分  $j_r$  が0、即ち  $E_r - i(\omega_{ce}/\omega)E_{\theta}$  が0のため、周方向電場  $E_{\theta}$ （長波長のヘリコン波）がアンテナで励起されると径方向電場  $|E_r|$ （短波長のTG波）( $\gg |E_{\theta}|$ ) が励起され、表面付近でこのTG波の強いパワー吸収が起きる。

次にこのモード変換理論と実験との比較について述べる。残念ながら、TG波は波数が実数部も虚数部も大きく微細

構造のため、静電プローブ、電流プローブ、レーザー誘起蛍光法、レーザー共同散乱計測法等多く試みられたが、直接的なTG波の測定はまだ成功していない。<sup>7)</sup> しかし間接的な結果ながら、ヘリコン波にTG波を含む解析を行った結果は実験結果と良く一致している。例としてガス圧力、電子密度、アンテナスペクトル、磁場強度を幅広く変えたパラメータ領域で、アンテナ抵抗（アンテナとプラズマの結合度を示し、高いほどパワー吸収効率が良い）、励起高周波磁場分布、密度ジャンプ（ある高周波入力パワー以上で、ICPからヘリコンモードへ遷移するため密度の大幅な変化がある）等の実験結果の説明が可能である一方、TG波を解析から除いてヘリコン波のみとすると、実験と一致しない結果が得られている。<sup>15,16)</sup> なお関連して  $\omega \sim \omega_{LH}$  領域では実験的に若干密度増加が見られる場合があるが、生成効率はプラズマ半径のどこにその低域混成周波数の条件を満たす層が存在するかに依存する。<sup>10)</sup>

### 3. ヘリコンプラズマの特性とプラズマ源開発

1990年代に入り多くのユニークなヘリコンプラズマ源開発とその特性評価が、アンテナ構造と励起波数フーリエスペクトル及びアンテナ抵抗との関係、高密度プラズマ生成効率、輸送現象との関連を踏まえた励起波動と密度分布測定等がなされた。またこの数年でも、課題とされた点や種々のパラメータ拡張<sup>7)</sup>でも進展している。具体的に開発された主な点は、1) アンテナ構造（スペクトル）、2) プラズマ源のサイズと構造、3) 磁場強度とその磁場配位（電磁石及び永久磁石の使用）、等様々である。その際、ガス種とガス圧力、励起周波数、高周波出力も変えている。ここで1)から3)の順に記述する。

第1に、ヘリコンプラズマ生成用アンテナであるが、図3(a)–(e)に示したような様々なアンテナやそれらの複合型が、最適なアンテナスペクトルを分散関係（図1）から出して設計したアンテナも含め試みられた。<sup>3)</sup> 石英ガラス等の円筒絶縁物の側面外にアンテナを巻き、(a) ループ（シングルやマルチターン： $m=0$ ）、(b) ボズウェル型 ( $m=$

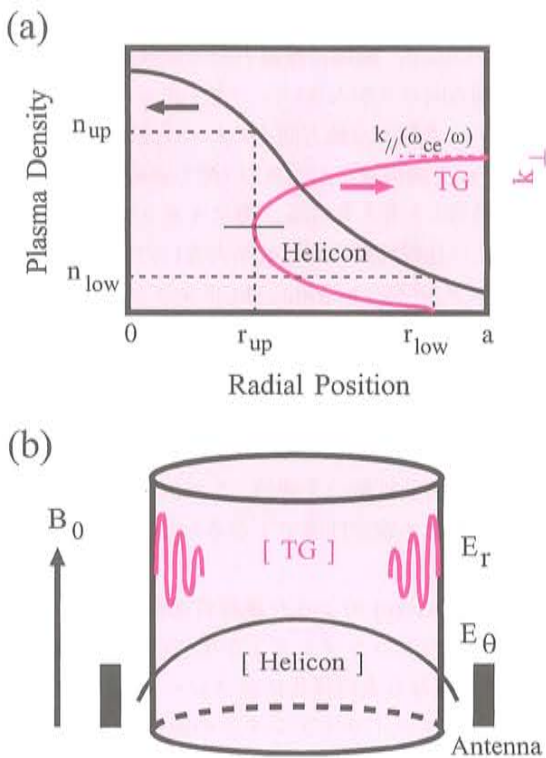


図2 ヘリコン波からTG波へのモード変換モデル：(a)密度（非一様、黒線）と  $k_{\perp}$ （赤線）の空間分布を示し、 $r_{up}$ で両者の波の  $k_{\perp}$  が同じとなるため、右下から励起されたヘリコン波から、TG波へモード変換が起こる共鳴過程、(b)表面で励起されたヘリコン波（長波長の  $E_{\theta}$  成分）が、TG波（短波長で減衰の大きい  $E_r$  成分）へモード変換をする非共鳴過程（一様密度分布）。

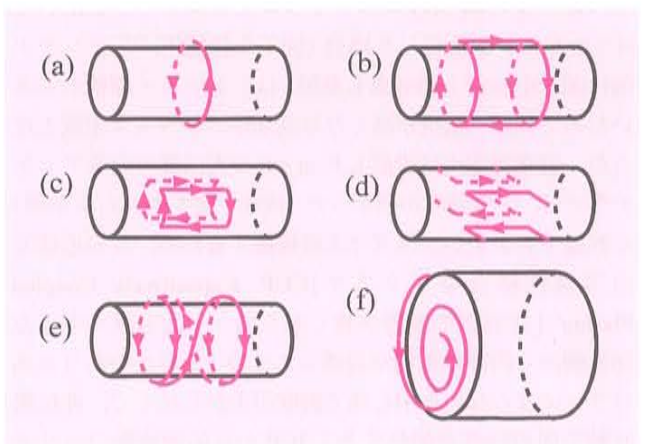


図3 ヘリコン波を励起する様々なアンテナ形状。



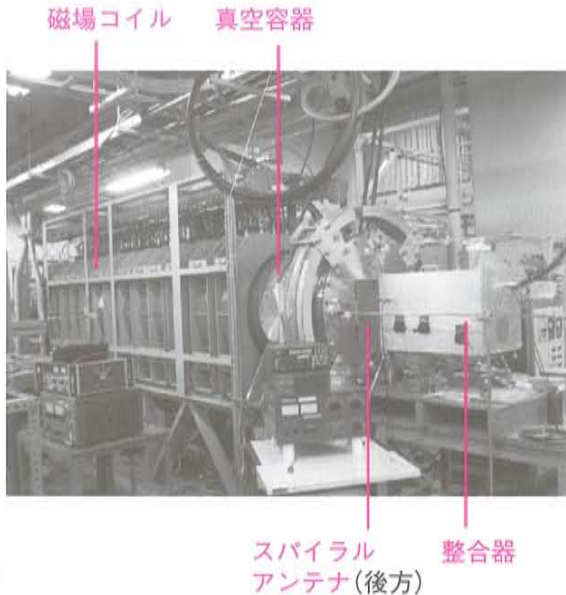


図4 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)・宇宙科学研究本部 (ISAS) の共同利用設備である世界最大容量ヘリコンプラズマ源の写真: 真空容器直径 74 cm, 長さ 486 cm.

±1),<sup>9)</sup> (c) 鞍馬型 (主として  $m = \pm 1$ ), (d) 核融合研究でプラズマ生成とイオン加熱で用いられた名古屋タイプ III 型 (アンテナ間の電流位相制御で  $m = 1$  や  $-1$ ), (e) ヘリカル型 (半ターンやフルターン, 印加磁場の向きによって  $m = 1$  や  $-1$ ) の励起法である. 大口径プラズマ生成には, (f) フラットスパイラルアンテナ ( $m = 0$ )<sup>17, 18)</sup> があり, 容器軸端にあるガラス窓の外に巻いてある.

ところで実験で得られた上記のアンテナ抵抗のスペクトル依存性は, 計算からの予想より弱かった. それはアンテナスペクトルを高密度放電維持 (分散関係から評価) だけでなく, 初期からのプラズマ生成の双方を考慮しないといけない点, 生成にもヘリコン波動以外の無視できない吸収部分がある点, プラズマ中の不安定性と閉じ込めの点, 計算コードの不完全さの点等から来たものと思われる. 但し  $m = 1$  モードの励起では, 実験と計算の双方とも  $m = -1$  と比べ効率良い生成と良好な波動伝搬を得ている. 一方  $m = 0$  については,  $m = 1$  モードと特性はあまり変わらなかった. また図 3(f) のスパイラルアンテナ<sup>17, 18)</sup> を用いて  $m = 0$  モードを励起した場合 (図 4 が装置例,<sup>19)</sup> アンテナ例は図 5 中の右上の写真も参照) は, アンテナ面積も大きいのでアンテナ抵抗が高くなり高効率のプラズマ生成となるが, 真空容器内に設置した  $m = 0$  の大口径の内部アンテナ<sup>20)</sup> では, 生成効率が悪かった (後述: 図 5 中の右下が例). それはアンテナがプラズマと直接接するため, その近傍での容量性結合型プラズマ [CCP: Capacitively Coupled Plasma<sup>1)</sup>] 生成等の影響が強くなる点と, 大半径で半径方向外側から内部に電場が浸透しにくい (そのためかなり高パワーにならないと中心部で密度が上がりにくく, 非伝搬波動で周辺のみ加熱である ICP から伝搬波動のヘリコン波への速い遷移がしにくい) 点があるためと考えられる.

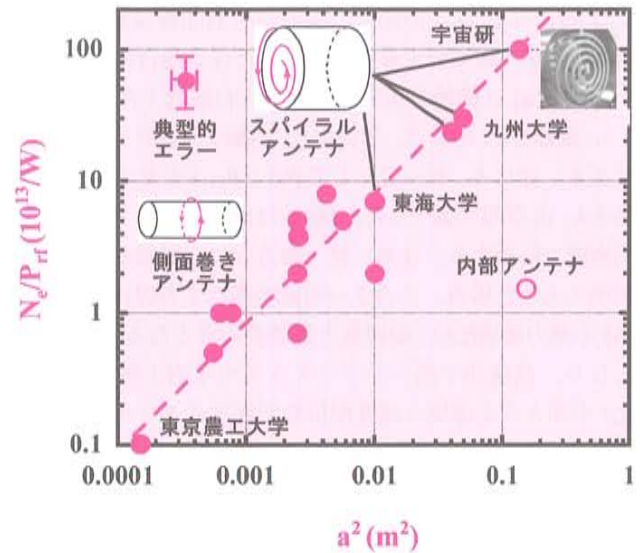


図5 世界の主な装置での生成効率 (全電子数  $N_e$  と高周波パワー  $P_{rf}$  の比) と半径の 2 乗との関係.

第 2 に, 円柱状プラズマ源 (直線磁場装置) のサイズを変えた結果について述べる. 図 5 には世界の種々の装置のデータを使い, 空間積分した総電子数  $N_e$  を高周波パワー  $P_{rf}$  で割ったものを縦軸, プラズマ半径  $a$  の 2 乗を横軸に取っている. これを計算結果と比較する. 電荷の蓄積がプラズマ中で起こらないために, 電子とイオンがトータルで同一粒子束 (結果的に遅い粒子種での損失率で決まる) となる両極性拡散<sup>2, 8)</sup> を考える. 電子はイオンより質量が小さいために熱速度がイオンより大きく, またラーモア (Larmor) 半径 (磁場に垂直方向に円運動するジャイロ半径) が小さいので, 磁場に垂直方向の拡散が小さく磁場に沿っての軸方向ロスが大きい. 一方イオンについては, 今回の実験データ群では軸方向 (イオン音波程度の速さの損失) より, 径方向のロスが大きい (即ち弱磁場/小プラズマ径, 長軸長等) と考えられる. 更にイオンサイクロトロン周波数に比べ比較的衝突周波数が大きいので, 拡散係数  $D$  は無磁化モデル<sup>2, 8)</sup> の  $kT_e/m_i\nu_i$  ( $k$ : ボルツマン定数,  $T_e$ : イオン温度,  $\nu_i$ : イオンの衝突周波数) を使うと, パワーバランスから結局  $N_e/P_{rf}$  は  $a^2$  に比例する予測<sup>21)</sup> となり実験結果とほぼ一致する (空間平均電子密度を  $\langle n_e \rangle$ ,  $L$  をプラズマ軸長として書き直すと,  $\langle n_e \rangle/P_{rf} \propto 1/L$  の予測となる). 絶対値もこの古典拡散の予想値 (これが考え得る理想最大値で実験的には不安定性等で下がる) の 2-3 倍低い程度で良好な結果である.

なお, 図 2(a)-(e) のような絶縁管の側面にアンテナを巻いて高密度ヘリコンプラズマが生成可能なのは直径 20 cm 以下で, 更なる大口径化にはブレークスルーが求められていたが, スパイラルアンテナの使用によって, 直径 74 cm, 長さ 486 cm までの世界最大容量 ( $V = 2.1 \text{ m}^3$ ) レベルの高効率・高密度プラズマが達成されている (図 5 の右上: 重要な分布制御も可能で特許も取得).<sup>19, 21)</sup> 更にこのアンテナでは,  $P_{rf}$  が 1 W ( $\sim 0.5 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ ) 以下の低パワー



でも、 $10^9 \text{ cm}^{-3}$ からの CCP も生成可能である。<sup>19,21)</sup> これに対し既述したように、図 5 右下の内部アンテナ<sup>20)</sup>では、大半径・大容量でも生成効率は非常に低い。他の大口径化の方法では、7つの小直径のプラズマソースの合成により直径約 40 cm で  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  程度のプラズマ生成が、永久磁石(但し数 10 cm の短軸長)<sup>22)</sup> と電磁石<sup>23)</sup>の使用で行われたが、後者は独立生成したプラズマの合成が困難で電子密度が空間的に不均一であった。

次に小容量ヘリコンプラズマ源について、アスペクト比  $A$  (軸長と直径の比) も含めて述べる。小さい  $A$  は応用プラズマプロセスやプラズマ推進(ロケット)に、経済性や重量性の観点から有効である。小容量では、直径 4.5 cm で長さを 10 cm ( $A=2.2$ ,  $V=160 \text{ cm}^3$ ) まで縮めてヘリコン放電に成功<sup>24)</sup>したが、軸長が短く励起波長と同程度のため、定在波が励起され波数が離散的となった。これは式 (5) の分散関係(図 1) からわかるが、入力パワーに対し密度も離散的な値を取り興味深い。また更に他の実験では直径 2.5 cm で長さ 4.7 cm ( $A=1.9$ ,  $V=23 \text{ cm}^3$ ) でも高密度放電が行え、長さを制限したエンド部を取ると  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  を達成している。<sup>25)</sup> 低アスペクト比の観点からは、直径 48 cm, 軸長 22.4 cm ( $A=0.47$ ) で数 10 G の低磁場で、 $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  以下の密度のヘリコンプラズマ生成<sup>17)</sup>が可能となっている。最近では直径 74 cm で軸長を 5.5 cm ( $A=0.074$ ) まで下げ、 $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  程度のヘリコン放電<sup>26)</sup>に成功している。低アスペクト比のためイオンが径方向でなく軸方向にロスが大きいとすると、前述の  $N_e/P_{rf}$  は軸長  $L$  に比例するのが予測<sup>21)</sup>(またの表現では  $\langle n_e \rangle / P_{rf} \propto 1/a^2$ ) され、実験的にこのスケールに合っている。<sup>26,27)</sup>

第 3 に磁場強度と磁場配位について述べる。磁場強度は通常 100 G から kG 程度であるが、高磁場化(分散関係と閉じ込めの観点から更に高密度化も可能)で直径 10 cm のコンパクトなサイズながら 10 kG までの装置が開発され、<sup>28)</sup> 非一様磁場配位であるがプラズマ推進研究で最近 16 kG の装置が運転されている。<sup>29)</sup> 逆に低磁場では 2 つの興味深い現象があり、放電が容易でかつ磁場コイルとコイル電源が簡易で低コストである点は応用にも重要である。

1 つ目は、上述したヘリコン波放電に ICP 放電から遷移する場合の密度ジャンプがあるが、低磁場の数 10 G 以下では明らかなジャンプがなくほぼ連続的にヘリコン放電に移行している。<sup>18,19,21,27)</sup> また磁場の上昇と共に、密度ジャンプが鮮明となりジャンプするのに必要なパワー  $P_{rf}$  が増加する。<sup>19,21,27)</sup> これはパワー吸収(アンテナ抵抗がパラメータ)とプラズマ損失とのバランスで、安定点を考慮<sup>16,30)</sup>する事により理解できる。もう 1 つは 50 G 以下のある磁場では、式 (5) の分散関係(図 1) から波数が一定なら密度は磁場と共に上昇するはずであるが、密度が他の磁場より高い場合が見出されている。<sup>31)</sup> 励起波動のアンテナ付近や終端板からの反射<sup>31)</sup> 及びポンデロモーティブ力(電場の 2 乗の勾配が効く非線形項)等が効く可能性があるが原因

は確定していない。これはアンテナ付近で非一様磁場(収束磁場や一对のコイルの電流を反対にして作ったカスプ磁場)の場合、密度が上昇する現象との関連も考えられる。なお非一様磁場(カスプ, 収束, 発散磁場)の場合の、興味深い波動伝搬とプラズマ生成についても詳細に調べられている。

以上は直線型装置の結果であるが、トーラス型では小規模の単純トーラス(ドーナツ方向の磁場のみ)<sup>32-34)</sup> からステラレータ型(外部磁場コイルによりドーナツ方向とドーナツ断面の周方向磁場を形成)の核融合装置<sup>35,36)</sup>まで開発され、 $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  までの高密度生成実験と種々の波動解析がなされた。

#### 4. 広域プラズマ科学への展開

高密度プラズマ源の特長を用いた展開研究は基礎から応用まで種々あり、特に米国での多種・多様な研究は現在でも 20 研究機関に及ぶほど多く今でも年々漸増している(一方日本では少ない)。例えば永久磁石を用いたコンパクトソースや、マルチソースと複合ソース開発、懸案となっている TG 波の検出、プラズマ分光や諸計測、中性子源への応用、低放射性廃棄物処理関連や、後述するドリフト波乱流、アルベン(Alfvén)波励起、プラズマ推進、ダブルレア(Double Layer)等の研究がある。

さてヘリコン源の特長を生かした新規の基礎物理実験では、低密度では周方向超音速プラズマ流[強い速度シェア(Shear)]<sup>37)</sup>とイオン分離の原理実証実験<sup>38)</sup> プラズマ中心ではほぼゼロの密度やホローからピークした分布までの径方向度分布制御<sup>37)</sup> 高密度と低密度間の自励双安定密度遷移現象<sup>39)</sup> ダブルレア<sup>40)</sup> 高密度ではアルベン波の基礎研究<sup>41)</sup>等がなされつつある。ここでダブルレアは電気 2 重層と呼ばれ、プラズマ電位が電子温度の数倍程度の大きな空間変化となる狭い層を持ち、従来電流が装置軸方向に流れる系で研究されていた。ヘリコンプラズマは無電流系であり、最近発散磁場配位でかつ低圧力でダブルレアが発見された。この生成物理機構解明は興味深く、一方このダブルレアを利用したイオン加速によるプラズマ推進(後述)やイオンビーム利用のプラズマプロセスも考えられる。宇宙においてダブルレアは例えば太陽風による月のウェイク(この静電場がホイッスラー波を励起する場合もある)に関連し、電流が流れる系であるが電離-磁気圏境界付近のダブルレア(オーロラ粒子加速)等への理解の一助ともなり得る。次にアルベン波は電磁現象研究でノーベル物理学賞を受賞した天文物理学者のアルベンが存在を予言したもので、磁気流体力学で重要な役割(オーロラや衝撃波にも関連)を果たしており更なる理解が望まれている。この研究は従来使われている BaO 放電[低密度で取扱いが不便でかつ装置長 20 m 程度も必要<sup>42)</sup>]等に代わって、数 m 以下の比較的コンパクトなサイズで、放電が容易なヘリコン源を用いて進展する可能性がある。



更に最近ではヘリコンプラズマを高密度下で制御して強い密度勾配を作り、ドリフト波不安定性を発生させ、そのドリフト波乱流とそこに至る遷移現象を理解する研究が、直線磁場装置(多数あるが例えば文献43-46)やステラレータ装置<sup>36)</sup>等で広く精力的に行われている。日本でも文部科学省の特別推進研究で活発になされた。この波による低周波の静電揺動は、磁場存在下で密度と温度の積である圧力の空間不均一性があれば不可避免的に存在するため、核融合をはじめプラズマの閉じ込め(問題となっている異常に速いプラズマ輸送現象)の解明に重要であり、また励起された波数や周波数間の結合やカスケード、エネルギーのやり取り等の理解は基礎乱流現象の分野にも貢献できると考えられる。

高密度ヘリコン源を使った応用として最近注目を浴びているのは、プラズマ推進(プラズマロケット)である。勿論この手法はプラズマ加速や産業応用にも適用が可能である(高熱流束はプラズマ-壁相互作用を考慮した熱負荷研究にも重要)。化学ロケットの燃焼と比べ高温プラズマの排出を利用すると、比推力(排出速度を重力加速度で割ったもので秒が単位)が高く惑星間飛行に有利で、ヘリコンの無電極による低不純物で長寿命の特性も活かした研究が盛んとなっている。象徴となっているのはNASAでの有人火星飛行研究で、<sup>29,47)</sup> 図6のVASIMR™ (The Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket: 物理テストベッド) 計画で示すように、ヘリコンプラズマ生成部(Helicon Antenna)とイオン加熱部(ICRH Antenna: 磁場に垂直方向に高周波でイオンを加速)があり、その加速イオンを磁場に平行方向の速度に変えて左端の磁気ノズル(発散磁場)から排出するものである。現在磁場を10 kG以上に増強<sup>29)</sup>し200 kW レベルまで徐々に加熱パワーを増やし、成果を挙げつつある。また、M2P2 (Mini-Magnetospheric Plasma Propulsion)<sup>48)</sup> のように、双極子磁場をヘリコンプラズマで広げ実質体積を増やしたミニ磁気圏を作り、太陽風を受け止めて推進するアイデア(磁気プラズマセル)も生まれた。同様に双極子磁場を用いた磁気ノズルの効果

を考慮し、小型でパルスながら数10 kWの高パワーでプラズモイド(プラズマの塊)を生成(ソース部で密度 $10^{12}$ – $10^{14}$  cm<sup>-3</sup>)し排出する方法も始められている。<sup>49)</sup> 別の方法として小ヘリコンプラズマを生成し、非対称周方向電場、回転電場等を利用するオール無電極のプラズマ生成と推進<sup>25,26)</sup>という方法も提案され原理実証実験が行われている。なお既述したヘリコンプラズマ中のダブルレアを用いた推進<sup>40)</sup>も候補であるが、ダブルレアの形成条件や電位差が低い等克服すべき問題がある。

## 5. 今後の展望

周知のようにプラズマは非線形現象の宝庫であり、複雑性、構造的性(自己組織化も)を持つ多様な現象(ヘリコンでは既述したように密度ジャンプや励起波動がベッセル関数で表されるのが例)示すため、それを生かした更なる興味深い研究の進展が望まれる。ここでは今後の展望について、残されているヘリコンプラズマの物理現象の課題、そのプラズマ源開発、今後の広域プラズマ科学への展開研究の順に述べる(これらの要約は図7参照)。

第3章で述べたように種々のプラズマ源開発と共にヘリコンプラズマ物理現象の理解が進んできたが、以下が課題と考えられる。1) TG波検出: モード変換理論が高密度プラズマ生成の候補としてほぼ現象が明らかになってきたが、直接観測(微細構造の測定)によるプラズマ生成の実証が残された課題である。TG波はヘリコン波が励起されなければモード変換されないので単独で存在しにくい、逆にTG波の直接励起をすることも考えられる。それには通常の誘導性結合アンテナ(図3)では難しく、静電的なアンテナによる試みも重要である。但し生成機構には他にも電子ビームや、パラメトリック<sup>7)</sup>に励起された揺動及び励起TG波による説もまだある。<sup>10)</sup> 2) 波動現象: 磁場配位と境界条件に依存する波動現象は生成にも絡んで解決すべき点がある。後者は規格化した境界条件(サイズ)や時間スケールにより存在が異なるホイッスラー波とヘリコン波間の

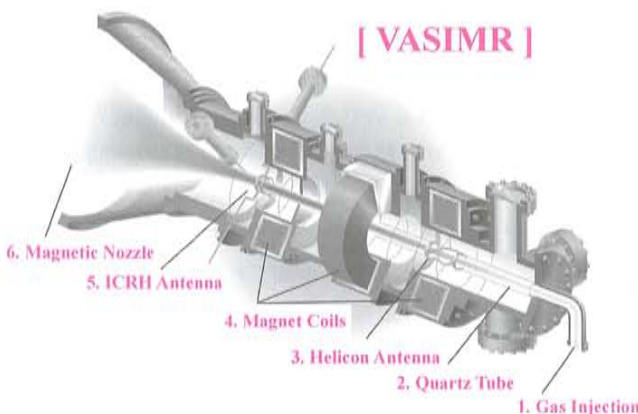


図6 NASAによる火星への有人ヘリコンプラズマロケット(VASIMR™)装置での物理テストベッド)計画の構想図(文献47中の図を一部修正)。

## 広域プラズマ科学への展開

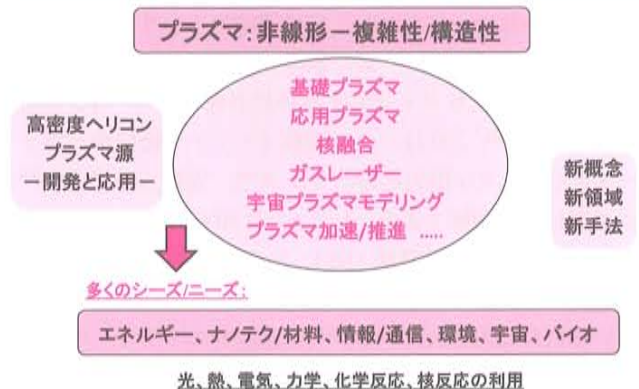


図7 今後期待されるヘリコンプラズマ科学研究の概念図。



遷移も考えられ興味深い。<sup>50)</sup> 急峻の密度分布で長軸長の場合、径方向に局在したヘリコン波が存在するとの議論もある。<sup>10)</sup> 未解決である高次の径方向モード(2章で述べた $k_{\perp j}$ で $j > 1$ )の存在<sup>26, 27, 51)</sup>も、磁場配位や密度分布<sup>27)</sup>の問題と絡んでいる可能性がある。イオン温度<sup>52)</sup>が古典計算による予想より高く、また低域混成周波数領域では更に温度が高い現象も不安定性との関連も含め調べる必要がある。なお今後の波動解析では従来の解析法<sup>11, 13, 53-55)</sup>にとどまらず、FDTD法(Finite Difference Time Domain Method)<sup>56)</sup>や粒子シミュレーションのPIC(Particle in Cell)コード<sup>57)</sup>等を試すのも興味深い。

次にイオン源やラジカル源も含めたヘリコンプラズマ源開発としては一段落しているが、以下の点が重要と考えられる: 容積/口径/アスペクト比<sup>17-27)</sup>や印加周波数等の領域拡大, 更に密度分布制御,<sup>19, 21)</sup> 新アンテナ設計, 高密度限界の探索。ここで密度領域拡大に関して $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 以上のより高密度を達成できるかを、不安定性<sup>43-46)</sup>や中性粒子の枯渇等を考慮して、高パワー入力や高磁場<sup>28, 29)</sup> [式(5)の分散関係から波数が一定なら密度は磁場と比例]で試みる必要がある。またカスプ磁場配位で、ループとなった無磁場付近の領域に高周波を印加する磁気中性線放電(NLD: Neutral Loop Discharge)<sup>58)</sup>の場合も、ヘリコン波による生成が絡んでいる可能性がある。なお基礎実験では通常希ガスや水素が用いられているが、プロセスプラズマ等の応用では反応性ガスも使われるため、種々に分離したガス種(負イオンも含む)の反応を考慮した計測や評価が挑戦的課題である。

最後に広域プラズマ科学への展開を考える際、ヘリコンプラズマの(低密度から)高密度・高電離と運転の簡便さ、広範なサイズと運転領域、更に無電極、無電流の特長を生かすのが重要である。具体的分野として図7中央に示した分野(基礎プラズマ, 応用プラズマ, 核融合, ガスレーザー, 宇宙プラズマモデリング, プラズマ加速/推進)のみならず、プラズマの光, 熱, 電気, 力学, 化学反応, 核反応(図7下)を利用して、多くのシーズとニーズがあるエネルギー, ナノテク/材料, 情報/通信, 環境, 宇宙, バイオ分野(図7下)等への展開が期待できる。

基礎プラズマ, 核融合, 宇宙等に共通するものとしては、非線形波動現象, 構造形成と不安定性, 衝撃波, 乱流, 異常加熱, 磁力線再結合(ダブルレアやオーロラ形成機構も含む)の研究が考えられる。一例として、低磁場での高ベータ( $\beta$ : プラズマ圧力と磁場圧力の比)実験<sup>59)</sup>があり、核融合でもなかなか達成できない1以上の高ベータのプラズマ特性(強い反磁性)や不安定性の研究が挙げられる。

他研究でも通じることだが、研究の進展には新概念(新解釈/モデル), 新領域(領域拡張や異領域), 新手法(新技術による診断・制御)の3つが原動力(図7右)と考えられ、例えば新発想によるハイブリッド領域への展開も重要である。これらを念頭に今後益々ヘリコンプラズマの広域

科学研究への貢献があることを期待している。

本稿で紹介した内容の一部は、コンスタンティン・シャムライ氏, 谷川隆夫氏, 都木恭一郎氏(残念なことに2009年5月26日にご逝去), 羽田亨氏, 船木一幸氏, 研究室の多くの関係した学生諸氏との共同研究によるものである。また河合良信氏の支援・激励に感謝します。

## 参考文献

- 1) プラズマ・核融合学会編:『プラズマエネルギーのすべて』(日本実業出版社, 2007).
- 2) M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg: *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994). [佐藤久明訳, 堀勝監修:『プラズマ/プロセスの原理』(EDリサーチ社, 2001)].
- 3) S. Shinohara: *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** (1997) 4695, and references therein (Review Paper).
- 4) R. W. Boswell and F. F. Chen: *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** (1997) 1229, and references therein.
- 5) F. F. Chen and R. W. Boswell: *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** (1997) 1245, and references therein.
- 6) 庄司多津男, 坂和洋一: プラズマ・核融合学会誌 **74** (1998) 29 (参考文献あり)(講座).
- 7) 篠原俊二郎: プラズマ・核融合学会誌 **78** (2002) 5 (参考文献あり)(解説).
- 8) F. F. Chen: *Introduction to Plasma Physics* (Plenum Press, 1984). [内田信二郎訳:『プラズマ物理入門』(丸善, 1977)].
- 9) R. W. Boswell: *Phys. Lett.* **33A** (1970) 457.
- 10) E. Scime, A. M. Keesee and R. Boswell: *Phys. Plasmas* **15** (2008) 08301, and references therein.
- 11) F. F. Chen: *Plasma Phys. Control. Fusion* **33** (1991) 339.
- 12) J. B. Taylor: *Phys. Rev. Lett.* **33** (1974) 1139.
- 13) K. P. Shamrai and K. R. Taranov: *Plasma Sources Sci. Technol.* **5** (1996) 474.
- 14) S. M. Mahajan and Z. Yoshida: *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 4863.
- 15) S. Shinohara and K. P. Shamrai: *Plasma Phys. Control. Fusion* **42** (2000) 865.
- 16) K. P. Shamrai and S. Shinohara: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 4659.
- 17) J. E. Stevens, M. J. Sowa and J. L. Cecchi: *J. Vac. Sci. Technol. A* **13** (1995) 2476.
- 18) S. Shinohara, S. Takechi and Y. Kawai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) 4503.
- 19) S. Shinohara and T. Tanikawa: *Rev. Sci. Instrum.* **75** (2004) 1941; *Phys. Plasmas* **12** (2005) 044502.
- 20) B. P. Cluggish, et al.: *Phys. Plasmas* **12** (2005) 057101.
- 21) T. Tanikawa and S. Shinohara: *Proc. 12th Int. Cong. on Plasma Physics, Nice, 2004*, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00002013/en/> (2004).
- 22) F. F. Chen: *Plasma Source Sci. Technol.* **10** (2001) 1.
- 23) C. Watts: *Rev. Sci. Instrum.* **75** (2004) 1975.
- 24) M. Nisoo, Y. Sakawa and T. Shoji: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) L777.
- 25) K. Toki, S. Shinohara, T. Tanikawa and K. P. Shamrai: *Thin Solid Films* **506-507** (2006) 597.
- 26) S. Shinohara, T. Hada, T. Motomura, T. Tanaka, T. Tanikawa, K. Toki, Y. Tanaka and K. P. Shamrai: *Phys. Plasmas* **16** (2009) 057104 (Invited Paper).
- 27) T. Motomura, K. Tanaka, S. Shinohara and T. Tanikawa: *J. Plasma Fus. Res. Series*, in press.
- 28) S. Shinohara and H. Mizokoshi: *Rev. Sci. Instrum.* **77** (2006) 036108.
- 29) J. P. Squire, et al.: *Proc. 30th Int. Conf. on Electric Propulsion*, Florence, 2007.
- 30) K. P. Shamrai and S. Shinohara: *Thin Solid Films* **506-507** (2006) 555.
- 31) F. F. Chen: *Phys. Plasmas* **10** (2003) 2586.
- 32) O. Grulke, F. Greiner, T. Klingner and A. Piel: *Plasma Phys. Control. Fusion* **43** (2001) 525.
- 33) S. K. Tripathi and D. Bora: *Nucl. Fusion* **42** (2002) L15.
- 34) Y. Sakawa, M. Ohshima, Y. Ohta and T. Shoji: *Phys. Plasmas* **11**



- (2004) 311.
- 35) P. K. Loewenhardt, B. D. Blackwell, R. W. Boswell, G. D. Conway and S. M. Hamburger: *Phys. Rev. Lett.* **67** (1991) 2793.
- 36) N. Krause, C. Lechte, J. Stöber, U. Stroth, E. Ascasibar and J. Alonso: *Rev. Sci. Instrum.* **73** (2002) 3474.
- 37) S. Shinohara, N. Matsuoka and S. Matsuyama: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 1154.
- 38) S. Shinohara and S. Horii: *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** (2007) 4276.
- 39) S. Shinohara and S. Matsuyama: *Phys. Plasmas* **9** (2002) 4540.
- 40) C. Charles: *Plasma Sources Sci. Technol.* **16** (2007) R1, and references therein (Topical Review).
- 41) J. Hanna and C. Watts: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 4251.
- 42) W. Gekelman, H. Pfister, Z. Lucky, J. Bamber, D. Leneman and J. Maggs: *Rev. Sci. Instrum.* **62** (1991) 2884.
- 43) M. Light, F. F. Chen and P. L. Colestock: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 4675.
- 44) C. Schröder, O. Grulke, T. Klinger and V. Naulin: *Phys. Plasmas* **11** (2004) 4249.
- 45) G. R. Tynan, M. J. Burin, C. Holland, G. Antar, N. Crocker and P. H. Diamond: *Phys. Plasmas* **11** (2004) 5195.
- 46) S. Shinohara, *et al.*: *Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XXVIII)*, Prague, 2007.
- 47) F. R. Chang-Diaz: *Sci. Am.* **283** (2000) 90.
- 48) R. M. Winglee, J. Slough, T. Ziemba and A. Goodson: *J. Geophys. Res.* **105** (1999) 21067.
- 49) R. Winglee, T. Ziemba, L. Giersch, J. Prager, J. Carscadden and B. R. Roberson: *Phys. Plasmas* **14** (2007) 063501.
- 50) S. Shinohara and A. Fujii: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 3018.
- 51) H. Takeno, Y. Yasaka, O. Sakai and R. Itatani: *Nucl. Fusion* **35** (1995) 75.
- 52) M. M. Balkey, R. Boivin, J. L. Kline and E. E. Scime: *Plasma Sources Sci. Technol.* **10** (2001) 284.
- 53) A. Fukuyama and Y. Ichida: *Proc. Int. Conf. on Plasma Phys.*, Nagoya, 1996 (TASK Code).
- 54) Y. Mozouris and J. E. Scharer: *Phys. Plasmas* **5** (1998) 4253 (MAXEB Code).
- 55) D. Arnush: *Phys. Plasmas* **7** (2000) 3042 (Helic Code).
- 56) 宇野 亨: 『FDTD法による電磁界及びアンテナ解析』(コロナ社, 1998).
- 57) C. K. Birdsall and A. B. Langdon: *Plasma Physics via Computer Simulation* (McGraw-Hill, New York, 1985).
- 58) T. Uchida and S. Hamaguchi: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** (2008) 083001

(Topical Review).

- 59) E. E. Scime, *et al.*: *Phys. Plasmas* **7** (2000) 2157.

著者紹介



篠原俊二郎氏: 専門は基礎から応用までのプラズマ科学. <http://zone.aees.kyushu-u.ac.jp/~sinohara/Homepage/sinohara.html>

(2008年9月25日原稿受付)

Development and Application of Helicon Plasma Sources

—Evolution of Extensive Plasma Science

Shunjiro Shinohara

abstract: Recent advances in plasma science are remarkable, and are deeply indebted to the development of sophisticated plasma sources. While numerous methods have been proposed for producing the plasma, helicon plasma sources, capable of generating high density ( $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) plasma with high ionization degree ( $>$ several ten percent) over a wide range of external control parameters, have been utilized in such broad areas as fundamental and processing plasmas, nuclear fusion, gas laser, modeling of space plasma, plasma acceleration/pulsation, among others. On the other hand, a number of important issues are left unsolved, in particular, those relevant to the wave phenomena and efficient plasma production. Solutions to these issues are expected to play key roles in taking full advantage of the helicon plasma sources in the next generation. In this article, we overview our current understanding of the helicon plasma production and recent development of characteristic helicon plasma sources, and discuss possible future advancement of extensive plasma science utilizing them.