

磁化プラズマ中の渦について —中性粒子の流れと相互作用する渦—

九州大学・総理工 田中雅慶 (Masayoshi Tanaka)

Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences

Kyushu University

アルゴンプラズマ中で電場によるドリフトとは逆方向に回転する渦が観測された。この渦は、背景中性粒子の流れとプラズマが相互作用することによって形成されることが明らかになった。この渦形成メカニズムの存在は、プラズマだけにその原因を求めてきた従来の捉え方から、相互作用する二つの流体間の構造形成へと考え方の変更をせまるものである。今回、高精度なレーザー誘起蛍光ドップラー分光システムを開発し、プラズマと相互作用する中性粒子の流れが観測できるようになった。

1. まえがき

外部磁場が加えられたプラズマは渦の宝庫である。荷電粒子の集合であるプラズマは、磁場中ではローレンツ力($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$)により運動方向に垂直な向きの力を受ける。いま、プラズマ中に圧力勾配があつて、その方向に力を受けたとすると、運動は圧力勾配の方向には起こらずに、力と磁場の両者に垂直な向きに起こる。この事情は、大気の運動と似ていて、低気圧の中心に吹き込もうとする流れが、地球の自転によるコリオリ力を受けて回転する流れ(渦)をつくるのと同じである。

プラズマの場合、力の方向と磁場の両者に垂直な流れをドリフトと呼び、力の種類に応じてそれぞれ名前が付いている。たとえば、圧力に起因するドリフトを反磁性ドリフト、内部電場によるものを $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフト、磁場の曲がりによるものを彎曲ドリフトと呼んでいる。磁化プラズマが渦の宝庫と呼ばれるのはこのドリフトを生む力の多様さにある。

種々のドリフトのなかで、最も重要なのは $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトである。プラズマ中の渦の大半は $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトによって回転している。このドリフトはイオンと電子が同じ方向に(電荷依存性がない)、同じ速度で(質量依存性がない)動くという特徴を持っている。従って、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトはイオンと電子の中性流体的な(電流を伴わない)流れを生む。 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトの発生メカニズムについては参考文献[1]を参照されたい。

これまでに観測された渦で面白いものを図1に示す。図1(a)は真ん中に密度の穴が空いた渦で台風と類似の構造をしている。図1(b)の渦は3極構造の渦である。[2] 1990年代に水槽実験で見つかり、その後海洋やプラズマでも観測されたものである。どちらもプラズマ物理の観点から

すると、常識を覆す(異常な)渦であることが最近わかってきたが、本稿では、図1(b)の渦に関連した実験結果を報告する。

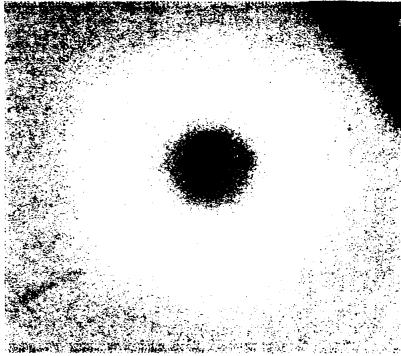


図 1(a): プラズマホール(ヘリウム)
中心の暗い部分は周りに比べて
粒子密度が低い。

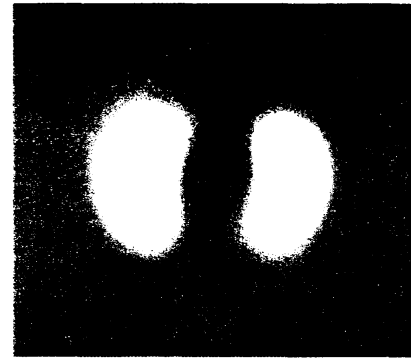


図 1(b): 3 極渦(アルゴン)
両端の白い部分と中心の暗い部分
は逆方向に回転している。

2. 中性粒子の流れとプラズマの相互作用

図 1(b)の渦がなぜ、異常かという、電場が存在するのに、渦の回転方向は $E \times B$ ドリフト方向とは逆方向に回転しているのである。この事実は、電場より強い力がプラズマに働いていることを意味していて、その力が何なのかということが問題となる。その原因は、中性粒子の流れとプラズマの相互作用によるものであることが明らかになってきたが、そのようなメカニズムが働くことはこれまで予想もされていなかった。[3]

この問題を調べるには、より対称性の良い単極渦構造を測定するほうが理解しやすい。図 2 に

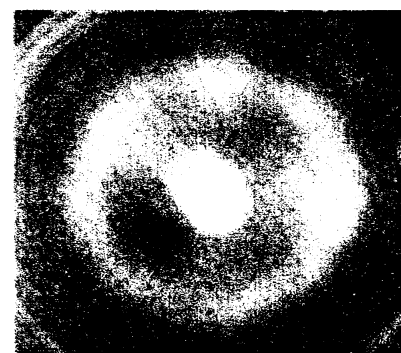
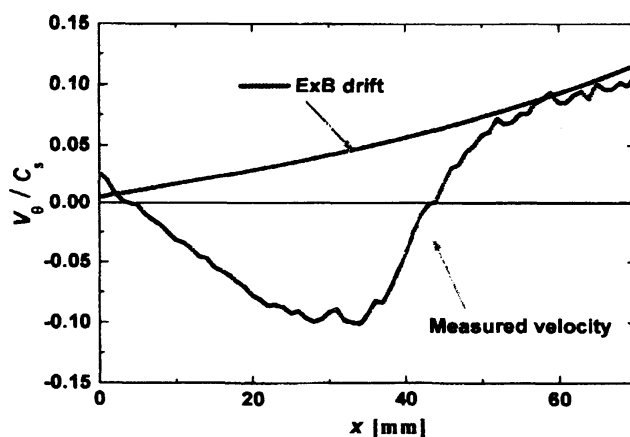


図 2 : イオンの周方向流速. $|x| > 50\text{mm}$ では $E \times B$ ドリフトと一致しているが、 $|x| < 50\text{mm}$ ではイオンは $E \times B$ ドリフトと逆方向に回転している。

アルゴンプラズマ中に発生した単極渦構造のイメージ(右図)と渦の回転速度の径方向分布(左図)を示す。図中、速度はプラズマ中のイオン音波で規格化された値(マッハ数)を示している。電場計測も同時に行い、それから求めた $E \times B$ ドリフト速度も示している。渦の中心は $r=5\text{mm}$ の所にあり、渦の回転速度は、中心から半径 50mm までは、 $E \times B$ ドリフト方向とは逆方向である。一方、渦の外周部の周速は $E \times B$ ドリフトに一致しており、電場によって渦の回転が駆動されていることを意味している。

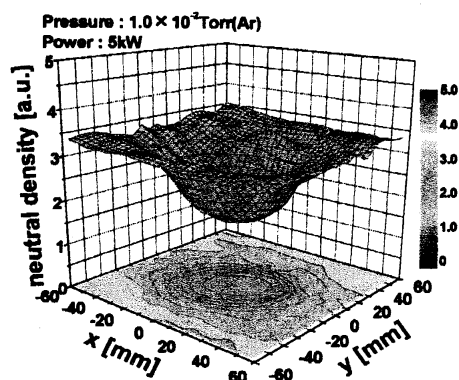


図3 中性粒子の密度分布。真空装置終端からプラズマの発光を測定した結果を基に計算した。中性粒子の密度は中心付近で深く窪んでい

この渦のもう一つの特徴は、図3に示すように中性粒子の分布に深い窪みが存在することである(この窪みは図2のイメージの白く見えているところに対応している)。中性粒子の密度勾配は中心に向かう流れを誘起し、その流れとプラズマ(イオン)が相互作用すれば、中性粒子の流れの運動量がプラズマ(イオン)に輸送され、力の発生源となり得る。また、弱电離プラズマであることを考えると(イオン密度 $\ll$ 中性粒子密度)、中性粒子の流れがイオンの流れに比べて一桁遅いと仮定しても、2つの流体が持っている運動量の総量は同じ程度か、逆に中性粒子の方が多くなり得る。従って、両流体間の相互作用に伴う力によってプラズマの運動が本質的に変化することも可能であると考えられる。

中性粒子-イオン間の相互作用については、電荷交換相互作用が最も重要である。図4に示すように、電荷交換相互作用は運動量交換が非常に大きく、また、低エネルギー(数eV)のイオンの場合、電荷交換衝突が最も頻度が高い。[4]

以上の考察に基づくと、プラズマと中性粒子からなる系の流れ構造を正確に理解するためには、プラズマの運動と同時に中性粒子の運動も測定しなければならないことになるが、従来は、中性粒子は背景流体として一様かつ静止して分布し、運動するプラズマに対して抵抗力を発生するというように考えられてきた。このため、中性粒子の流れを可視化しようとする動機が生まれず、

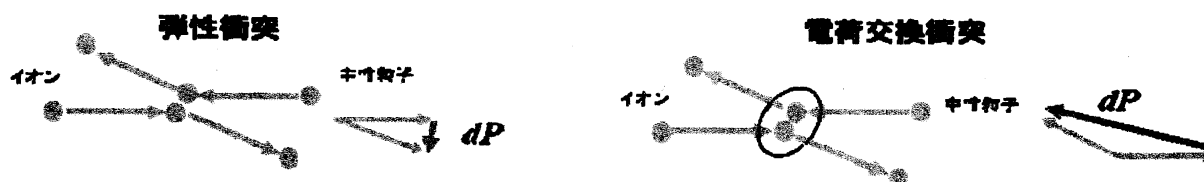


図4 同じ小角散乱でも弾性衝突では運動量変化は小さいが(左図)、電荷交換を行うと衝突前後の運動量変化は大きなものになる(右図)。

現在までその測定法が確立していない。

3. 半導体レーザーを用いた誘起蛍光ドップラー分光システム

プラズマ粒子と違って、中性粒子の流れはプローブ法による計測が適用できないので、光学的な手法に頼らざるをえない。また、空間的な分解能も要求すると、レーザー光によって局所的に中性原子を励起し、そのとき放出される誘起蛍光を観測する方法が唯一の手段となる。この手法はレーザー誘起蛍光法(LIF)と呼ばれており、プラズマに限らず、様々な研究分野で広く使われている。標的となる粒子が巨視的に流れていると、吸収するレーザー波長はドップラーシフト分だけずれることになる。従って、レーザーの波長を掃引しながら誘起蛍光を観測すると、平均流速に相当したドップラーシフト分だけずれた所にピークを持ち、温度に対応した広がり（ドップラー広がり）を持つ誘起蛍光信号が得られる。これはレーザーのスペクトルが十分狭い場合には粒子の分布関数に比例する信号となる。中性粒子は常温(0.025eV)に近いと考えられるので、分布関数の広がりには波長に換算して2pm(@696nm)程度である。したがって、レーザー光源としてはこれよりはるかに狭いスペクトルのものが必要となるが、半導体レーザーはこの要求を満たしている（スペクトル幅は2桁以上狭い10fm程度のものが得られる）。

中性粒子の流れを測定する難しさは、その流れの遅さにある。数100m/s程度の速さで流れる

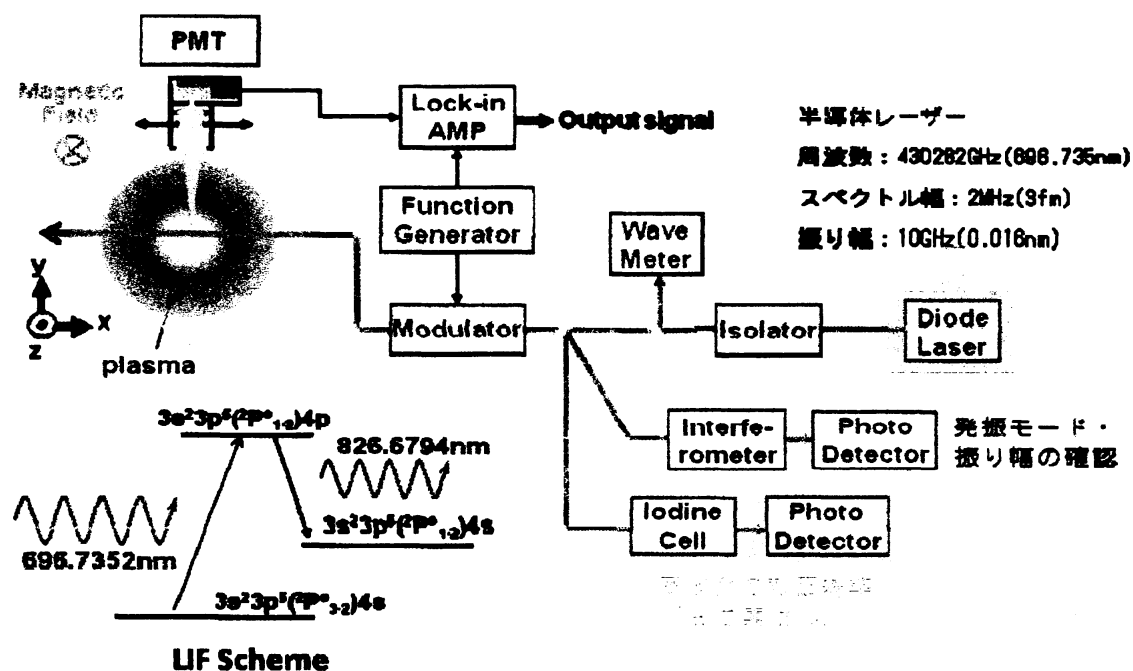


図5 半導体レーザーを用いた誘起蛍光ドップラー分光システム

イオンにくらべて中性粒子は 10m/s 程度の流速であると予想される。そのため、LIF ドップラー分光システムは 1m/s の程度の分解能が要求される。この流れに対応するドップラーシフトは周波数換算で約 10MHz となり、レーザーの発振周波数 10^{14} Hz に比べて $\Delta f/f = 10^{-7}$ となる。このような高精度の LIF ドップラー分光システムはこれまで開発されていなかった。

図5に中性粒子流速測定のために開発された LIF ドップラー分光システムを示す。430281.8GHz (696.7352nm) で発振するレーザー光を 100kHz で振幅変調した後、径方向からプラズマに入射し、アルゴンの準安定原子を励起状態に上げる ($3s^23p^5(^2P_{3/2}^o)4s \rightarrow 3s^23p^5(^2P_{1/2}^o)4p$)。そして、励起された原子が脱励起する際に放出する 362646.6GHz (826.6794nm) の蛍光 ($3s^23p^5(^2P_{1/2}^o)4p \rightarrow 3s^23p^5(^2P_{1/2}^o)4s$) を装置上方に設置された光電子増倍管 (PMT) で受光する。その際、プラズマの自発光成分のうち 826nm 以外のスペクトルは S/N 比低下の原因となるため、バンドパスフィルタを設置して除去する。光電子増倍管の出力信号は、S/N 比を改善するため、電流増幅後にロックイン検出を行って LIF シグナルとした。レーザー光の変調は高い周波数まで対応できる電気光学素子を用いている。

高精度 LIF ドップラー分光システムを開発する上で重要な要素は、絶対波長をどのように決めるかということである。図に示すシステムでは、ヨウ素セルの吸収線を吸収分光法によって同時計測する方法を採用している。これはレーザー光を分岐してヨウ素セルを通過させ、その吸収スペクトルから 430277.1GHz と 430282.7GHz の吸収線を同定することにより絶対波長校正を行うものである (現在は、より精度の高いアルゴンの飽和吸収分光法を採用している)。

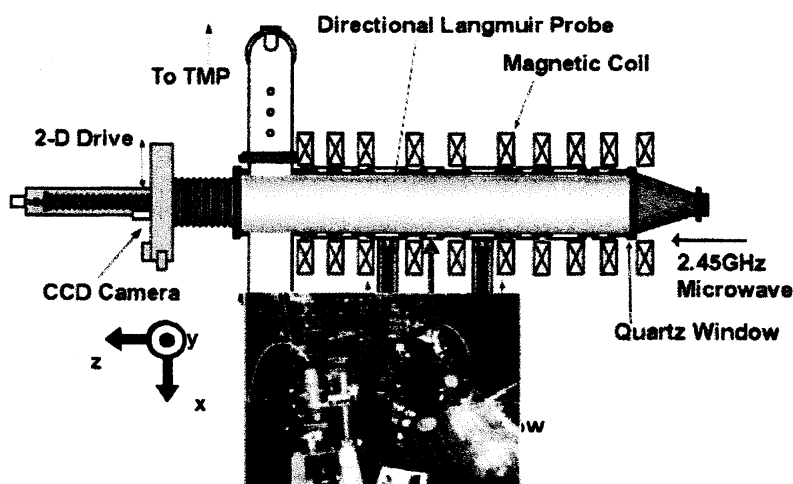


図6 HYPER-I (High Density Plasma Experiment) 実験装置と半導体レーザーシステム

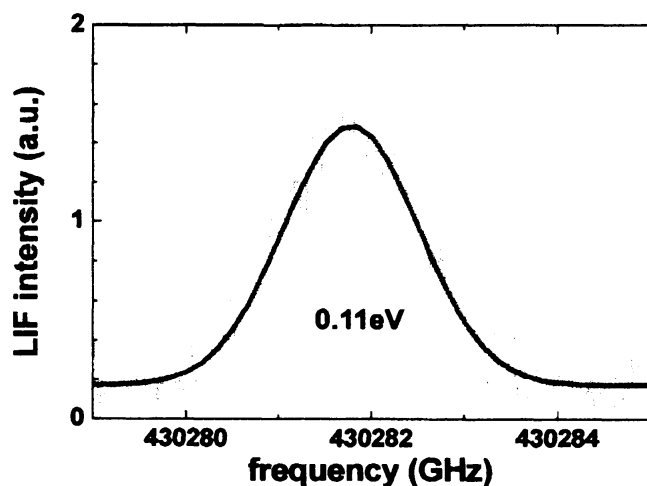


図7. LIF スペクトル. マイクロ波パワー 5 kW. 実線は 0.11eV のガウス分布.

蛍光 (LIF) スペクトルを示す. 横軸はレーザーの発振周波数を表記しているが、波長換算で図の端から端までは 10pm (0.1 Å) に対応している. 図中実線は 0.11eV のガウス分布で、実験データはこの曲線に良く一致している. 従って、中性粒子の温度は約 1200K であることがわかる. 常温 300K に比べて高いのは、イオンとの電荷交換相互作用によりイオンのエネルギーの一部が中性粒子のエネルギーに変換されているからである.

実験は核融合科学研究所の HYPER-I 装置を用いて行った (図 6). プラズマは、直径 30cm, 長さ 200cm の真空容器中にガス圧 1.0×10^{-2} Torr のアルゴンを充てんした後、マイクロ波を用いた ECR 加熱を行うことによって生成した. マイクロ波の周波数は 2.45GHz で、パワーは 40W から 5kW の間に設定して行った. 単極渦は 5kW 入力時に観測される.

4. 実験結果

図7に測定されたレーザー誘起

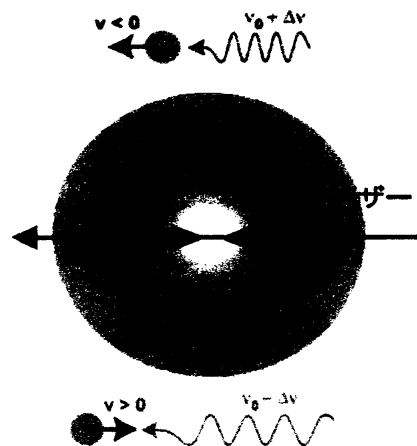
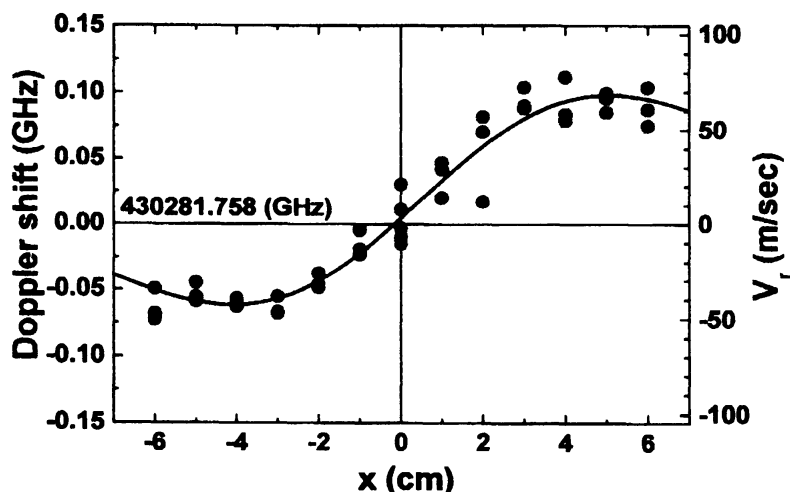


図8. 中性粒子の径方向流速分布(左図). レーザー進行方向と同じ方向に動く粒子は高い周波数で共鳴吸収し、レーザー光に向って動く粒子は低い周波数で吸収する(右図). 左図のデータは中性粒子が内向きに流れていることを示している.

径方向の各点で LIF スペクトルを求め、ピーク位置の相対的なずれ(ドップラーシフト)から流速の分布を求めた。図 8 は LIF スペクトルから決定した径方向の速度の分布を示している。図中 x 軸の正の領域ではドップラーシフトは正であり(右図参照)、 x 軸の負の領域ではドップラーシフトは負である。レーザー光の進行方向と同じ方向に動く粒子はドップラーシフト分だけ低い周波数を感じるため、吸収はその分だけ高い周波数のところで起きる。一方、レーザー光の進行方向に対して向かっていく粒子の場合は、レーザーの周波数を高く感じるため、吸収はドップラーシフト分だけ低い周波数のところで起きる。この図が示すドップラーシフトの結果は、中性粒子がプラズマの中心に向かって流れていることを意味しており、図 3 に示した、中心が窪んだ中性粒子の密度分布の結果から予想される流れとも矛盾しない。中心に向かう流速の最大値は約 70m/s であり、イオンの流れ(約 500m/s) に比べると一桁低い値である。すでに述べたように、このプラズマは弱電離プラズマであり、中性粒子の密度はプラズマの密度より一桁以上高い、従って、中性流体が持っている流れの運動量はプラズマのそれと同程度かまたはそれ以上である。

以上の実験結果から、中性流体と相互作用するプラズマの渦形成メカニズムについて、次のような解釈ができる(図 9 参照)。プラズマは中性粒子を電離することによって、その密度分布に穴を掘る。中性粒子密度分布に不均一性が生じると、内向きの流れが発生し、流れの運動量が電荷交換相互作用によってイオンに輸送されて力を及ぼす。その結果、この力と磁場の両方に垂直な方向に渦回転が発生する。極端な言い方をすれば、プラズマが中性粒子分布に穴を掘り、その反作用を受けて回っていると考えることができる。

まとめ

プラズマの渦は通常 $E \times B$ ドリフトによって回転している。本実験でも電場は存在しているが、渦は中性粒子の流れに起因する力によって駆動されている。この事実は、ある条件においては、中性粒子に起因する力の方が電場より強く働き、プラズマの渦構造形成に新たなルートをもたらすことを意味している。

中性流体とプラズマの相互作用は電離圏-熱圏相互作用、すい星のテールと太陽風相互作用、核融合周辺プラズマなどにおけるプラズマのダイナミクスや構造形成に重要な役割を果たしていると考え

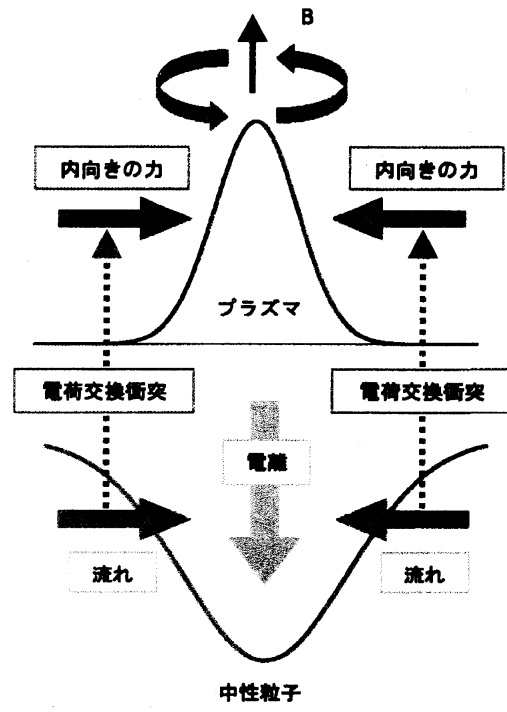


図 9. 中性粒子の流れと相互作用する渦の形成メカニズム。

えられる。また、相互作用する 2 流体という意味においては、超流成分と常流動成分が共存する量子流体中の渦形成や化学反応流体などにも共通する物理を包含している。

プラズマと中性粒子からなる系の構造形成を明らかにすることは、これら相互作用する流体のダイナミクスや構造形成の研究にも貢献することが期待できる。これまで可視化することができなかった中性流体の流れ場を観測できるようになったことは、大きな進展であるといえる。

参考文献

- [1] M. Y. Tanaka, M. Kono, S. Yoshimura, 日本物理学会誌 **61**, (2006) 498
- [2] A. Okamoto, K. Hara, K. Nagaoka, S. Yoshimura, J. Vranješ, M. Kono, M. Y. Tanaka, Phys. Plasmas **10**, (2003) 2211.
G. F. J. van Heijst and R. C. Kloosterziel Nature **338**(1989) 569
- [3] A. Tomita, Master Thesis, Graduate School of Science, Nagoya University, 2006
- [4] B.H. Bransden and M.R.C. McDowell, *Charge exchange and the theory of ion-atom collisions*, Oxford University Press, 1992