流転する自然とプラズマ物理学

伊藤公孝

火を手にいれたときヒトが「人」になったと神話に言われるが、自然に満ちる物質とエネルギーの生々流転は人類を引きつけてやまぬ謎であり続けている。自然を観察した人間が、四元説（土・水・空気・火）のように、固体・液体・気体より先に光り輝く第4の物質状態を認めた。やがて数千年の時を経て、原子が解明され物質の性質が明らかにされている。原子は電子や原子核からなるが、温度がきわめて高くなると電子の原子核からの束縛が解ける。そして電子やイオンは、周囲の超多数の電子やイオンと力を及ぼし合いながら運動する。この気体より先のさらに高温での状態をプラズマと呼ぶ。身の回りでは、プラズマテレビの画面や蛍光灯の中などにプラズマ状態のものはあるが、宇宙全体では相当部分がプラズマ状態にあって、星や太陽が見えるのは、核融合反応エネルギーがプラズマの出す光となって地球に届いたものである。

プラズマは人類文明に時代を画している。文明の淵源は石器時代すなわち人類が「固体」を使いこなす時代から始まって、「液体」を使いこなす水力・灌漑や溶融技術による生存圏の拡張、蒸気機関など「気体」を使いこなす産業革命を経て、「プラズマ」を使う半導体加工素材生成や光技術の発展、さらにはプラズマを制御して制御核融合を実現し宇宙推進技術を探求するなど、現代・未来の文明へと連なっている。プラズマの活用が直接の新技术を生むだけではなく、プ

ラズマの理解は地球を取り巻く環境のダイナミクスをより深く理解させ、自然の中の人間を理解させるのである。

半世紀（人類史的には、ほんの一步）戻ると、物質の性質を正確に知る事ができるような、統計力学の進歩があった。一塊の物質は超多数の原子や分子から出来ているので、その中でほぼ無数の組み合わせの運動が起きうる。しかし、一定温度に落ち着いた熱平衡状態にあると、ある組み合わせの運動が起きる確率が公式として明確に与えられる。

自然の流転を知るにつれ、多くの物質は熱平衡状態にないことが分かってきて、この公式に変わる法則が探求されている。とくにプラズマの振る舞いは熱的平衡からかけ離れている。それは動いている電子やイオンは電磁場を変化させ、変化した場が他の電子やイオンの運動を変え、ミクロから大規模なスケールまで、各種スケールの電磁場を介在として超多数の粒子が集団的に運動するからである。その結果、粒子群から電磁場にエネルギーが移り、それが別の一部の粒子群に再び移るなど、時間空間を経てエネルギーがはこばれ続け、とうてい熱平衡状態に到達しない。逆に、大域的な境界条件を反映しつつ、粒子の運動と電磁場が共鳴し合う運動パターンや電磁場パターンが選択的に発生する。選択された場と運動のパターンが発達し、乱流状態になって細かな運動にちぎれていくと共に、一方でプラズマ全体に及ぶような大域的な電磁

場にエネルギーが集中する。これらの選択的なダイナミクス発生がプラズマに見られる性質の源になっている。巨視的な構造が微細な乱流運動によって拡散し構造がぼやけていくことと、乱流の中から構造が生まれる事が表裏一体の事柄である事が分かってきて、競合する速さが探求されている。非線形機構で誘起される構造の変化は、突発的に起きる。実験室で高温のプラズマ（図1）でそうした機構が明らかになってきている。磁場に着目すれば、乱流の中から大規模な磁場へとエネルギーが移行する過程が宇宙空間や地球内部で起きている「ダイナモ磁場」現象である。ミクロな熱対流から構造を持った磁場が生まれるプロセスが現在観察され始めている。太陽の活動自体、核融合反応を伴ったプラズマ乱流の典型例である。宇宙スケールでは、超長スケールで電子や粒子の加速が起きる。そ

PROFILE

伊藤公孝
（いとう きみたか 1952年生）
日本学術会議連携会員、自然科学研究機構核融合科学研究所教授・フェロー
専門分野：プラズマ物理学、非平衡系物理学、核融合科学

これらの事象は光や超高エネルギーの粒子となって地球圏に届き、自然界（宇宙）で何が起きているのかをプラズマ物理によって人類が知ることになる。荷電粒子と場が結合して集団現象を起こすところに、平衡状態からかけ離れた法則を探索するというプラズマ物理の視点は、遺伝子が荷電高分子であることを介して生命の法則へと流れ込もう。

流転するプラズマの法則を手立てにし、物理学と人類の知力は今後飛躍するだろう。

図1

大型ヘリカル装置（核融合科学研究所）に閉じ込められた数千万度のプラズマ。螺旋にひねったドーナツ型のプラズマを横から撮った写真。表面から出る光が螺旋の帯状に写り、中央の高温部分は強いX線を出している。