

「非平衡極限プラズマ全国共同連携ネットワーク研究計画」 が拓くプラズマ物理

伊藤早苗^{1,2)}, 兒玉了祐³⁾, 藤澤彰英^{1,2)},
 佐藤元泰⁴⁾, 田中和夫⁵⁾, 畠山力三⁶⁾, 伊藤公孝^{2,4)}
 (¹⁾九州大学応用力学研究所, ²⁾九州大学伊藤極限プラズマ研究連携センター, ³⁾大阪大学光科学センター,
 ⁴⁾核融合科学研究所, ⁵⁾大阪大学大学院工学研究科, ⁶⁾東北大学大学院工学研究科)
 (原稿受付: 2011年4月18日)

プラズマ物理学・核融合科学は、核融合プラズマ・高エネルギー密度プラズマ・プロセスプラズマ・ナノ-バイオプラズマ、など対象に応じて広く展開しています.現代物理学の新しい方法論を開拓するとともに、プラ ズマを活用したエネルギー開発や機能物質創成など、科学技術のフロンテイアを牽引しています.今まで個別に 発展してきたプラズマ物理科学の方法論を,非平衡極限プラズマという共通学理から連携しネットワーク化を推 進することによって普遍的な学理を探求し研究を加速することを目的に、大規模計画「非平衡極限プラズマ全国 共同連携ネットワーク研究計画」が提案されています.非平衡極限プラズマという共通学理をめざす統合研究が 進められています.この報告では、大規模研究の構想、先進研究の展開、広いプラズマ全体に通有の普遍的問題 への取り組み、という観点から連携研究の第一歩を紹介します.

1. 始めに

学術の大型研究の検討が,最先端科学研究に新たな風を 吹き込んでいます.プラズマ物理学・核融合科学分野でも 学問的競争力を強くアピールしており,日本物理学会やプ ラズマ・核融合学会の連携シンポジウムの実績や研究者コ ミュニテイの議論に立脚し,大規模研究「非平衡極限プラ ズマ全国共同連携ネットワーク研究計画」を構想していま す[1].この提案を含む3計画が日本学術会議「学術の大 型研究に関するマスタープラン」(2010年3月)に取り入れ られました[2].この構想は,文部科学省の科学技術・学 術審議会 学術分科会の「学術研究の大型プロジェクトの 推進に関する基本構想「ロードマップ」の策定」(2010年10 月)において優先度の高い18計画に盛り込まれています [3].このような学会や社会からの期待に応えるべく,連 携ネットワークの企画を推進し,研究を大きく展開するこ とが求められています.

この連携ネットワークを提案する大規模計画は、今まで 核融合プラズマ・高エネルギー密度プラズマ・プロセスプ ラズマ・ナノ - バイオプラズマ、などなど、対象に応じて 広く展開する最先端プラズマ物理研究の方法論を、非平衡 極限プラズマという共通学理から連携し研究ネットワーク 化を推進することを目的としています.本目的の実現のた めに、非平衡極限プラズマという共通学理から統合研究を 進めています.平成22年度には、日本物理学会のシンポジ ウム[4]、非平衡極限プラズマ全国共同連携研究ネット ワーク研究作業会[5]、仙台プラズマフォーラム[6]などの 統合研究が進められています.

本報告では,非平衡極限プラズマ全国共同連携研究ネットワーク研究作業会[5]の成果を報告します.本研究作業 会の主題としては,共通して scientific な成果が上がり,研 究の明確な目標設定を行うための, scientific gedankenexperimentを目的としています.今後展開する共同研究の 全体的なテーマとして

○「非平衡極限プラズマの定義・定式化を」(様々なプラズ マの「非平衡度」の問題設定や定量化)

○「非平衡極限プラズマをどう認知し、どう観察・計測す るか?」(様々なプラズマの乱雑・ダイナミックな場の 全体を測る)

などを共同研究作業に選びました.このアセスメントを 「構造と選択則」という観点から,keyissueやdrivingforce, collective modes, etc.について,鳥瞰的な展望を得ることを 目的としています.

当日の発表や議論をもとに,「非平衡極限プラズマ全国 共同連携ネットワーク研究計画」の連携研究の第一歩を報 告します.

2.「非平衡極限プラズマ全国共同連携ネット ワーク研究計画」の概観

クオーク,核子,原子,分子,多原子分子,DNA,人,地 球,太陽,銀河,宇宙に至るまで,現代科学は,様々なス ケールの構造と階層を明らかにしてきました.プラズマ は,電子やイオンなど原子サイズの粒子の多体系であり,

Frontier of Plasma Physics; 'Research Network on Non-Equilibrium and Extreme State Plasmas' ITOH Sanae-I., KODAMA Ryosuke, FUJISAWA Akihide, SATO Motoyasu,TANAKA Kazuo A., HATAKEYAMA Rikizo and ITOH Kimitaka 非平衡状態にあるがゆえに分子サイズレベルから宇宙天体 のスケールまで,ありとあらゆるスケールの構造とダイナ ミクスをもたらしています.「流転する自然」の典型的研 究対象である所以です.現代では,観測技術の発展により 天体や宇宙で起こる様々なプラズマに関連する現象が捉え られ,豊富なデータが蓄積されてきています.また,プラ ズマは様々な機能性物質の創成に必須の役割を果たしてお り,我々の生活の基幹技術を支えています.

プラズマ物理が培ってきた方法論は、宇宙の様々な対象 や現象の理解、制御核融合研究の加速、そして産業応用に 役立つことが示されてきています。これまで、プラズマ物 理科学は,磁場閉じ込め核融合,慣性核融合,プロセスプ ラズマ, 高密度プラズマ, 天体プラズマなど, 異なる対象 を相手に様々な分野に分かれて発展してきました. 昨今の 各分野での急展開を鑑みれば,分化発展してきたプラズマ 物理科学を再び体系化し学術的な法則として昇華すること で,更なる躍進が期待されます(図1参照).図に示したよ うな研究プラットフォームを作り上げることで、その結 果,非平衡極限プラズマを対象として,乱流,構造形成,動 的発展や遷移を取り扱う学問的方法を発展させることをめ ざしています. その相互理解に基づいて, 乱流輸送の制御, レーザー光の応用、場の制御、界面の制御、非平衡プロセ ス産業応用などの開発が進展します.研究の体系化はプラ ズマ物理の新しい領域を切り拓き、人類に新しい機能性物 質をもたらす新しい科学技術の確立を一気に加速すること ができるにちがいありません.

実際に、プラズマ科学は、現代文明に様々な進歩をもた らしていますし、今後も新たな進展を駆動していきます. 最も重要なプラズマ物理科学の応用例として, 地上の太陽 - すなわち核融合の実現があります.磁場閉じ込めプラズ マ特性を予測および制御するためには、プラズマの構造形 成を支配する乱流の研究が国際的に活発に行われてきまし た. 核融合研究の国際熱核融合実験炉 ITER では、これま での実験データの蓄積から得られた経験則を用いてその特 性が予測され,現在の設計が決定されています.しかし, プラズマ閉じ込めや特性を確かな物理法則に基づいて予測 されることが望ましいことは確かです. 正確な理解を求め る動機は、学問的動機に止まりません. 与えられたプラズ マ配位に対して、プラズマ乱流の第一原理的な理解に基づ いた法則が確立されプラズマ性能がより正確に予測できる ならば、実験費や核融合炉の建設費のさらなる有効活用が 可能となるにちがいありません.

非平衡状態にあるプラズマの構造形成の理解は,我々を 取り囲む宇宙や自然の理解を深くし,文化文明の更なる発 展に寄与します.図2は,プラズマ物理の理解が如何に自 然の理解や技術革新に貢献するかを示しています.今後の 10年程度を見通して,本研究がどのような学問的創造に繋 がるか(図の左上半分),そしてどのような科学的イノ ベーションに繋がるか(図の右下半分)を整理したもので す.乱流プラズマの理解は「どのようにして非平衡系にお いて構造が形成され発展するか」を示す新しい法則の確立 につながると考えられます.この図の中の進展に,大規模 ネットワークを構成するアプローチがどのようなインパク トを持つかが以下に説明されます.

3. 乱流プラズマ実験の新展開

磁化閉じ込めプラズマの乱流輸送研究の見地から, 遠非 平衡系の特徴について簡単に示します. 遠非平衡系にある 乱流プラズマでの輸送は単純な拡散輸送ではありません. 時空間での相互作用は非局所的であり, スケールの結合が 顕在化します[7,8].

単純な拡散現象というのは、勾配と流速が線形の関係で 結びつくものです. 二つのマーカーの運動に着目する と、その相対距離 *x* は時間 *t* とともに

 $\langle x^2 \rangle \sim D t$

のように緩やかに増加します (ここで $\langle x^2 \rangle$ は x^2 のアンサン ブル平均, D は拡散係数). バリステイックな運動であれ ば, $\langle x^2 \rangle \sim t^2$ のような増大を示します.輸送を引き起こす 揺動が熱平衡状態にあれば,エネルギーが揺動の各モード に等分配されるので,波長の短いモード程強く励起される ことになります. 細かなモードにエネルギーが集中するの で,揺動場による乱雑運動も相関長が短くなり,その結果 輸送現象が拡散輸送になります.

非平衡のプラズマでは、エネルギー等分配が成り立ちま せん.たとえば、イオンラーマー半径程度のスケールの揺 動が励起されます.それだけではなく、勾配長とイオン ラーマー半径の結合から生じる、両者の中間的な長さで特 徴づけられる揺動が現れます.典型的な例は、近年研究が 進んだ帯状流やストリーマです[9].その結果輸送は従来 知られている単純な拡散としては記述され得ないことにな ります.図3には、メゾスケールの帯状流に、微視的なド リフト波揺動が補足されモジュレーションを受けているこ とを実験で実証した結果を示します.

非平衡極限状態において、今後解明すべき、現象論的に 重要な事項は、

- (i) 輸送係数に対する「プラズマサイズ」の影響,
- (ii) 輸送係数に対する「形」の影響,
- (iii) 低周波低波数での大振幅:非拡散的, [すなわち, 相関長は勾配長のオーダになり;非局所性,相関 時間はメソー巨視的な時間になる;記憶の重要 性],

(iv)界面の存在,極限的な不均一や間欠性,

が挙げられ,いずれもプラズマの非平衡性に起因するもの です.今後のこれら現象論的な知識を第一原理から理解す る研究を実現していく必要があります.このような考察か ら必要な実験研究として,(スケーリング則から第一原理 則へ)

- (1) 励起された揺動の同定 [in progress]
- (2) 非線形相互作用と支配過程と因果関係の観測[将来]
- (3) 位相空間乱流を特徴づける非線形相互作用の同定 [将来]
- (4) 乱流輸送の定量的な法則の確立[将来] 非マルコフ過程について:記憶と揺動力

Project Review



プラズマ物理によって駆動される近未来の科学イノベーションの展望. 図2

2015年

非平衡新機能物

ーション

質創成:グリ-

イノベ

大域的構造と輸送について

「サイズ」と「形」と「記憶」の役割 は何か?

e-science

2010年

線形分

遷移のダイナミクスに関して

以上の事柄は乱流プラズマの新しい法則を確立するための 中心課題となっています.

今までの実験研究の進展を踏まえると、今や、プラズマ 全域に亘り-すべてのスケールにおいて-乱流構造を観測 するための方法を確立する時代となっています(図4). 加えて、実験研究は位相空間乱流に本質的な、ダイナミク スを特徴づけるために展開されると考えられます.磁場閉 じ込めプラズマ研究が1950年代に開始して以来,10年程で ドリフト波の重要性が認識されています. プラズマ乱流が 観測され、線形波動の問題ではなく、揺動の非相関時間が 周期程度と短かな、強い非線形乱流であることが認識され たのが1970年代のことです.この認識は、空間一点観測の 結果得られたものです. 2000年代になり, HIBP (重イオン ビームプローブ)を用い多点計測が行われ、帯状流やスト リーマーというメゾスケール揺動の発見や非線形結合観測 に道が開かれました. プラズマ全体に相関長が広がるよう な巨大な揺動が理論的に指摘されその端緒が見いだされて



Scientific

Innovation

西暦

2020年



います[11,12]. しかし, これらはほんの一部を垣間見たも のだと考えられます.実際、イオンラーマー半径程度のミ クロな揺動と、帯状流や巨視的揺動の非線形結合は、空間 的には、あるポロイダル角に局在しそれが時間的に動いて いることが理論的に指摘されています[13]. (1)-(4)を解 明する研究へと飛躍させるために, 揺動全体の非線形結合 を同時解析する研究が今後の新領域を開拓するでしょう.

4. 高エネルギー密度プラズマからの視点

光は、位相をそろえることで時間的、空間的に極めて小



図4 磁化閉じ込めプラズマの乱流輸送実験研究における、これまでの発見と将来の課題.

さな領域にエネルギーを集中させることができます. 高出 カレーザーによる高エネルギー密度状態は, 固体-プラズ マ中間状態から相対論プラズマ, 陽電子プラズマさらに は, 真空破壊といった様々な物理過程の複合状態や極限状 態が含まれ, 重相科学や実験室宇宙物理など学際的な学術 展開が期待されています. また単に多くの物理過程を含ん だ未開拓領域の探査だけではなく, 超コンパクト荷電粒子 加速器, テラヘルツから X 線に至る超広帯域高輝度パルス 電磁波源, 中性子, ガンマ線などの高輝度パルス放射線源, さらにレーザー核融合などこれらを利用した社会基盤にか かわる新技術の可能性を秘めています.

こうした研究で鍵を握るのは二つの問題です.一つは, 光のエネルギー密度を極限まで高めることです.それに は,超高強度のレーザーを開発することと併せて,レー ザーの光を集中させる方法が開拓されています.その代表 的なものが我が国オリジナルな新しいアプローチとして, 高エネルギー密度プラズマを利用したプラズマフォトニッ クデバイスです.もう一つの問題は,対象となる高エネル ギー密度プラズマの中で起きる非平衡過程であって,どの ようなダイナミックスが新しい物質状態を作り出すのか, 研究・解明していく問題です.

まず,光のエネルギー密度を極限まで高めるという視点 について,プラズマフォトニックデバイスの活用を紹介し ます([14]を参照ください).固体デバイスより高いエネ ルギー密度を有した高密度プラズマをデバイスとして利用 できれば、高いフラックスの光や荷電粒子ビームを直接制 御できます.これが高エネルギープラズマフォトニクスの 基本概念です.この概念のもと、高エネルギー密度プラズ マを利用した高強度光制御や高密度荷電粒子ビーム制御の デバイスとして例えばプラズマよる光反射機能(プラズマ ミラー)によるパルスクリーニングやkeV領域の超高調波 発生、光ガイド機能による効率的な粒子加速や高密度プラ ズマ加熱、分散機能(ラマン圧縮や電磁誘導透過)、波長変 換機能光機能などプラズマの性質を利用した高強度光制御 が可能になっています.最近、プラズマ集光ミラーにより 通常の大型レーザー装置では得られない高速集光系が可能 となっています(図5)[15].この技術と近年の超高強度 レーザー技術をもとにした研究プラットフォームの検討が 進んでいます.

次に、高エネルギー密度プラズマの中で起きる非平衡過 程について概説します.「非平衡」という視点を、時間の 競合という観点から整理したものが表1です.レーザー光 (の振幅や位相)の制御によって、原子の励起やイオン化を 急激に(時定数τで)引き起こし、それが緩和時間よりも短 ければ、熱平衡の状態方程式とは異なる物質状態を作るこ とができます.元来、レーザーの発振原理自体が、媒質の 反転分布を作るという非平衡状態から出発し、原子のエネ ルギー準位という選択性を用いて先鋭なスペクトルとコ



図5 プラズマ集光ミラー(左図中の写真)によって、従来の方法(中央図集光スポット)よりずっと高密度に光子を収束できる(右図集 光スポット).

Process	Time scale (laser excitation < relaxation time)	Example	
Atomic process	τ (excitation) < de excitation	x-ray nonlinear optics	
Flootron ion in Ploomoo	τ (wake field) < charge neutrality	Laser acceleration Plasma	
Electron-ion in Plasmas	au (ionizatlon) < plasma expansion	mirror	
Phase transition	τ (compression, cooling) < structural phase transition	High energy density material	

表1 高エネルギー密度プラズマの中で起きるプロセスの時定数の比較.

ヒーレンスを作り出しているのですから,非平衡性,選択, コヒーレンス,は一体となった概念です.超高強度のレー ザー光によって,改めて光のコヒーレンスを物質の巨視的 スケールでのコヒーレンスへと転写する研究が展開してい ます.

巨視的スケールでの時間の非平衡性に着目し, 高エネル ギー密度新物質・材料の研究を描いてみましょう. 高エネ ルギー密度新物質・材料の新たなブレークスルーの可能性 として積極的に研究が進んでいます. 高出力レーザーを使 用すると、テラパスカル以上の超高圧力を比較的容易に発 生させることができます. テラパスカル以上の衝撃波を利 用して、これまで高圧状態の状態方程式や液体金属、高密 度プラズマへの転移などが調べられてきました. 従来のア プローチは,ほとんどは単純な衝撃波による圧縮で,断熱 圧縮に伴うエントロピーの上昇によって、固体転移の実現 は不可能でした. ところが、レーザーや高密度プラズマ制 御により平衡・非平衡など様々超高圧縮技術が可能となり 固体状態で超高圧下の相転移が可能となってきています (図6左)[16]. これに伴いダイヤモンドより硬い"スー パーダイヤ"や超良導性の金属ダイヤの状態を実現できる 段階に来ています. さらに夢の物質であり量子性の強い固 体金属水素も視野に入る段階となってきています. レー ザーによる非平衡圧縮により半導体シリコンを金属化し取 り出すことができ、超高圧準安定相凍結も実現しつつあり ます. 超高圧準安定相凍結は、まさに非平衡科学の中心課 題です. 図6(右)にあるように,高圧がかかる圧縮時間 (この図ではt)や圧力解放時間を,結晶格子の緩和がバル ク全体で起きる時定数(この図ではr)より短くすることが 焦点と考えられます. プラズマ物理で発展してきた非平衡

状態遷移の成果とのシナジーを用いて,この緊急テーマを 急速に進展させることができるだろうと考えています.

5. 電磁波非平衡からの視点

磁化プラズマ閉じ込め研究では、トカマクのプラズマ電 流を維持するために速度空間の非等方性を利用し、電磁波 とプラズマの共鳴相互作用をさせるような選択的結合が活 用されています. さらに広い物質創生研究の中で、プラズ マ・核融合研究になじみがあるものとして、RF 波動場を 使い非平衡反応場を実現する研究が発展しています[17]. 本誌でも、プラズマ乱流の研究プロジェクトとRF 非平衡 反応場の研究プロジェクトについて、非平衡科学という観 点から共通性やアナロジーを述べて横断して描いています [18].

プラズマ物理学・核融合科学のアプローチから非平衡反応場を研究する上で、具体的には、揺動が選択的に励起されること、集団的応答の役割、相関長程度またはそれより短い勾配や界面、電場や磁場が選択的に特徴的ダイナミックスをもたらす事、反応や遷移の加速などに着目しています。熱エネルギーによって反応を進めていた従来の方法と比較し、非平衡現象を活用することで反応速度を高める、いわば「非平衡触媒」とも言うべき過程が研究できます。

図7に非平衡反応場の概念図を示します.熱によるエネ ルギー伝達と比較し,電磁波を使うことによって,特別な 波動のみにエネルギーを集中することができます.電磁波 の場の中で,反応が進むとして(図7の中央),i(initial)→f(final)という反応を考えると,熱で進むパスと比 べ,電磁場で進む場合は,パスに自由度ができます.その パスに沿って,途中の状態のエネルギーがどうなるか,概



図 6 高密度プラズマ制御による超高圧縮の新たなアプローチ(左). 左図には、熱平衡での相図の上に、非平衡パスを重ね書きしている. 圧縮と除圧、緩和の競合を示す(右). 除圧と緩和の競合が超高圧準安定相の凍結に鍵を握っている.



図8 電磁波反応炉の中の励起磁場と電場(左). 粒界を持つ系で, 波動のモード変換が起きる(右).

念図を示したものが図7(右)です.熱の場合(点線)途中 に超えるべきエネルギーの山があって,その高さが反応速 度を決めています(アレニウスの法則).電磁波を活用す ると,パスに自由度が現れるので,途中の山が低くなる可 能性がでてきます.

こうした自由度がどのように実験で研究できるか、非平 衡プラズマ物理との学術融合によって進展が開かれていま す. ブレイクスルーの一つは、電磁波を使うことで電場と 磁場を制御して活用できる点です.図8(左)に電磁波反応 炉の中に電磁波を励起した場合の,励起磁場と電場を示し ます. 電場と磁場を選択的に活用することによって, 物体 中にスピン波や分極波を励起する可能性が生まれます [19]. もう一つの基礎過程はモード変換と考えられます (図8(左)). [18]に述べましたように, 電磁波非平衡現象 を活用するためには、素材が粉体や粒界を持つシステムと なっています. その事は、電磁波の伝播に重要な役割を果 たしますが,同時に,モード変換を通じ反応の制御にも重 要な働きをしていると考えられます.図8(右)に示すよう に、電磁波と物質中で励起される音波(圧縮波)は分散関 係がかけ離れていますが、界面の存在(図の中でinterface という破線の波数ベクトルで示しています)により別の波 動へと変換されていく過程が、反応の進展に影響すると考 えられます.実際に電磁波反応炉を活用し、金属の還元を 行い,電磁波非平衡現象が実際に研究されています.

「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科学」研究は, RF科学技術を活用し,電磁波の伝搬における誘電損失や 磁性損失という立場から,新製鉄法を始め様々な物質創成 に成果を上げ,グリーンイノベーションにインパクトを与 えています. それと並行して,「非平衡反応場の科学とし て現象を解明する」という観点から,非平衡系科学にシナ ジーをもたらしています. 今後,非平衡構造,非平衡励起, 非平衡反応の三つの方向から電磁波非平衡プロセスの物事 を把握し,非平衡を生む機構の解明を通じて,非平衡プラ ズマの様々な過程を理解する上での典型的問題を与え続け ると考えられます.

6. 重相プラズマからの視点

重相プラズマの研究展望は[1]に述べられています. 磁 場・レーザー核融合炉の壁や宇宙往還スペースシップなど の外壁は,プラズマなどによる強大な負荷により,高エネ ルギー密度の状態に曝されます.こうした壁材料は,損耗 を受けこの極限環境において,複数の相(固相,液相,気 相,プラズマ)が時空間において混在する状態になります. これを非平衡な極限での重相状態と定義します.

宇宙往還スペースシップは,惑星大気に突入時にプラズ マなどの高熱負荷を受けます.磁場核融合炉実現には,炉 心プラズマから周辺に流出する膨大な定常および間歇的な プラズマ流負荷を受け止めるダイバータ板の損耗を抑制す ることができるかどうかが核融合発電実現の成否を決める 課題となっています.現在開発が進められている炭素構造 材による達成値と,開発目標を図9の許容損耗率と熱負荷 にまとめます.重相状態の負荷エネルギー緩衝効果を利用 することで,現在の材料固体単体で決まる耐熱負荷性能を はるかに超えた耐力[20]が実現できれば大きなインパクト を持つことになります.

高エネルギー密度負荷のもとで、プラズマや気体液体固



図9 高耐熱・高耐力材料の現状と今後の目標.

体が共存する状態を研究するための実験プラットフォーム が設計されています.研究ステップを次のようにシステマ テイックに構成する計画です.レーザーから発生させる量 子ビーム(レーザー,電子,X線,イオン,ガンマ線,中 性子線)など物質への透過能力や電場・磁場に対する感度 が異なる特性を利用した先進計測[21]を用いて重相状態の 各種基本特性(密度,温度,音速,熱伝導度など)の計測・ 把握が行われます.基礎実験からのデータをベースにし物 理モデルを構築していきます.重相プラズマのモデルを検 定し,重相状態の制御実験への指針を確立することで固体 の耐熱負荷性能の向上へと展開します.

最も単純に,高エネルギー密度負荷プラズマの非平衡ダイナミクスを研究する実験装置を図10に示します[22].

図10には、実際にレーザーで高エネルギー密度のプラズ マを炭素固体壁から噴出させる衝突実験の例を示します. この実験からは、次のような発見が報告されています.ま ず、プラズマプリュームが衝突することで、単独のプ リュームの運動エネルギーが50%(最大)吸収されるとい う結果が得られています.現象論的な観測の第一歩が始め られた報告です.更に、炭素のプラズマプリュームが衝突 する場合には、carbon nano tube (CNT)が生成されること



図10 レーザー生成高密度プラズマの衝突実験装置(左).二つ の噴出プラズマ(炭素)が衝突する実験(右).

が発見されています.原子分子にとどまらず,CNTまで同時に混在している状態は,重相の状態の多様性を描いているものです.原子・分子プラズマ物理学が急展開していますが,更に非平衡性の強いこうしたプラズマを,重相として捉える必要性を示していると考えられます.

と同時に,物理的にチャレンジングな現象も発見されて います.炭素のプラズマプリュームが衝突して CNT がで きるような条件下では,CNT 等を含む衝突プラズマが「滞 留する」という現象が発見されています.それぞれのプ リュームは直交する方向に運動していますから,衝突して も,それぞれ直行する方向の運動量を保ちつつ,運動量の ベクトル和の方向に動くことが期待されます.しかし,プ ラズマの「滞留」現象では,ベクトル和の方向に緩やかに 移動することが確認されており,謎を示しています.こう した現象をどのように理解するかは,ダイバータなど磁 場・レーザー核融合炉において極限環境下に曝される材料 の損耗抑制を向上させるシステマティックなアプローチの スタートと考えられ,さらに8章の研究シナジーの項で説 明します.

このようにスタートした重相プラズマの研究は,材料開発のステップを踏みながら,物理学にもチャレンジを提示して,プラズマ物理を刺激しています.

7. ナノ - バイオプラズマからの視点

材料や新機能物質創生にプラズマを応用する研究の領域 では、エネルギーキャリアを非平衡なプラズマとすること で、ナノ化・高機能化・バイオ適用化という研究潮流が生 まれています[23,24].

最近のプラズマ応用(基礎)分野では、環境・ナノ-バ イオ科学技術への応用が、非平衡プラズマに対する認識を 高めています.まず、大気圧プラズマの発生と制御、とい う観点からは、(1)気体液体界面プラズマの研究へ、(2) アーク放電からグロー放電へ、という流れがあり、その中 で「非平衡性」は重要な物理科学過程となっています. 生 体への適用を考えると、大気圧下での環境が必須になり、 また、液体中でのプラズマ制御も必須の要件となります. プラズマの機能性を高めるためには、電子温度とイオン温 度を分離し、電子とイオンの持つそれぞれの効果を適切に 制御する(例えばプラズマ粒子のエネルギーがもたらす エッチング能力向上と製作劣化効果という、相反する効果 を賢く最適化する)ことや、電極やシースの電場構造を制 御して、粒子エネルギー(平均)と温度(分散)を独立に 制御する、というように、プラズマの非平衡性を活用する ことが必須です.また、バイオ適用の上では、プラズマ粒 子だけではなく共存するラジカルまで含めて非平衡性が重 視されます. プラズマの荷電粒子とラジカルの寿命の違い を活かし時空不均一を制御することで、選択的に機能を発 現させるというところに本質の一端があります. このよう な要求に応えるため、大気圧環境下での気体液体界面プラ ズマの実験法を考案する必要がありますが、図11に示すよ うに, ionic liquid を活用することで実験のプラットフォー ムが実現しています[25,26].

例えば気液界面プラズマの研究においても,流体の対流 や揺動を制御する重要性が示されています。気体液体界面 に近傍の電場構造を活用し、イオンを加速して液相中の反 応を制御する立場からは、界面の安定化を要求することに なります. 界面付近の強い電場構造とその揺動への効果と いう過程は、Hモード物理で指摘されて以来、プラズマ乱 流の基礎的なプロセスであり、その研究方法は磁化プラズ マを中心に進展してきました. その研究方法は気体液体界 面プラズマに応用できるでしょう. 逆に,気体液体界面に 積極的に揺らぎを発生させ、選択的な揺らぎの増大によっ て自律的な周期構造を作り出す研究も進められています. 気体液体界面に選択的に自律的な周期構造を作り出すこと ができれば、その構造が液相での反応に転写され、固定化 することによってデバイスの機構化に活かせるという研究 です.フォトニック結晶やナノ分子メモリ等の応用を視野 に入れた先端研究が進んでいます.実験的には、図11のプ ラットフォームを活用しますが、揺動の自律的構造形成の 問題にも,大振幅孤立波や遷移ダイナミクスの解析等,磁 化プラズマの研究方法が活用できます.

更に研究を進ませるものが、図12にあるように、DNA と carbon nano tube (CNT), metal nano particle (MNP) との親和性の差という非平衡性に着目した研究展開です. DNA を MNP に付着させ、DNA-doped MNP を CNT に納 めて搬送し、レーザー光を用いて DNA-MNP を脱着するこ とをめざした研究が展開しています.

ナノーバイオプラズマ分野は,非平衡極限プラズマ反応 場を創成・活用し,ナノ領域の物理学的および生体学的に 新規・新機能性 構造・機能を創出する研究を展開してい ます.プラズマの荷電粒子とラジカルの寿命の違いを活か し,平均エネルギーと分散を制御し,時空不均一を制御す ることで,選択的に機能を発現させるという考え方は,磁 化プラズマやレーザープラズマの研究にも大きなインパク トを与えると思います.

8. 議論のまとめ

以上の様な研究で探求されている対象を統一的に考える ために, 鳥瞰図を表2に示します.表2は, それぞれの研 究対象のプラズマから見て, 非平衡性の特徴や, 集団運動 をまとめたものです. それらのダイナミックスが作り出 す,時間空間構造の視点と,時間のダイナミックスの論点 をまとめています. そして, それらの競合の結果どのよう な構造・状態・現象が選択され, 巨視的な観察に現れるか を, 法則の視点としてまとめています.

この表を左から右に見ていくと,現象を生み出す物理機 構について,時空境界条件と着目する運動から演繹的に理 解を積み上げていく,という論理構造になっています.右 端の部分が,実際に観測されたり法則として表現されたり するものです.

一方で、この表を上下に見ていくと、ある所で考えられ 研究された事柄が、他の所では別の形ででてくるという事 実も描き出しています. 独創的研究の飛躍は、しばしばア ナロジーから生まれます. 研究の普遍性は、「類型」「典



 図11 Ionic liquid を用いることで、大気圧から低圧迄、幅広く気 体液体プラズマを研究することが可能になった。



図12 DNAとcarbon nano tube (CNT), metal nano particle (MNP)からなる複合系.

型」としても現れるので、この表を上下に見ていくと、シ ナジーによる研究の加速に結びついていきます.

物理機構理解のシナジーと言う視点から整理したものが 表3です.この表では、過程の典型例が左端に列挙され、 対象となるプラズマごとにコラムを作っています. 例え ば, 遠距離相互作用を例にとれば, 磁化プラズマ乱流での 輸送現象に於ける nonlocal transient transport problem が 研究され、そのための今後のアプローチが3章に説明され ています. 重相プラズマでは滞留現象が観測されています (6章). それを理解するためには,運動量を運び去ってい る物質か場が生み出されていると考えることができます. 濃いプラズマと電磁場に加え、中性分子(場合によっては 高分子)が平衡状態に比べ高密度に生成されそれが運動量 輸送に大きな影響を持つ可能性が検討されています、電磁 波非平衡でも,還元反応を引き起こす上でのエネルギー キャリアが探査されており,界面に伴う集団運動の励起が 探求されています. それらは今のところ'hidden variable' (隠された変数)を捜す研究のステージです.隠された変数 という考え方からは、LH遷移の問題において、径電場構造 がその役目を果たしていると予言され、その後の研究の新

Project Review

展開をもたらしました.これが典型例として新たな理解を 加速的に生み出すと考えられます.逆に,重相プラズマで の運動量のキャリアが解明されれば,ナノ - バイオプラズ マでの機能性発揮を理解する上で新しい類型を与えると考 えられます.すなわち,励起高分子の非平衡ダイナミクス の重要性がナノ - バイオプラズマで重視されていますが, 単体としての応答でなく,複合的応答というような新たな 過程の発見も含め,更に完全な理解に寄与するでしょう (磁場閉じ込めプラズマでダイバーター部のプラズマの運 動量バランスの理解にも寄与するのは当然のことです).

時間の非平衡性に着目し、「記憶, 散逸との競争」の欄 を見れば, 超高圧物質の取り出しの研究が, 他のプラズマ

主っ	プラブフに担わる非亚衡州と集団運動	それがたたらす時の構造を記述	反視的な状態と迫求される注則を述べる
<u>37</u> Z	ノノスマに現れる非十関任と朱凶理劉	てれかもたり9时玍悟垣で記述。	日祝町な仏態と迫ぶされる広則を述べる。

	非平衡性の特徴	集団運動	構造の視点	時間のダイナミクス	法則の表現
磁化プラズマ 乱流	不均一性	ドリフト波	時間構造	記憶関数 乱流の中の記憶 遷移の寿命	記憶関数と揺動力で決まる ポテンシャル 非線形選択枝と確率統計 遷移の寿命 流束の非ガウス統計
	流れと対称性の破れ	種々の波動	空間構造 輸送障壁 組成変化・混合	遷移と (熱平衡での) 緩 和の競合	メゾスケール場 電磁場 巨視的な場と界面構造 e.g. stochastization
			位相構造 <i>f</i> (<i>x</i> , <i>v</i>)	共鳴と不可逆性	
ナノ-バイオ プラズマ	気体液体界面 反応場	プラズマ波・ 表面張力波	界面プラズマ構造		ナノカーボンなどの(内部 や周期)構造転写 tran- scription
	イオンと電子の温度差	電荷中性の破れ		nano-scale 輸送	
	気液界面接触電位	ビーム粒子	創成物質機能構造	界面媒介構造転写 イオンやラジカルの寿	複合生体分子等の選択的相 互作用・物質変換
	脱化学平衡律則			 命差による構造と機 能発生 	生体等の選択的相互作用
重相プラズマ	エネルギー密度不均一	プラズマ波	状態構造	低温 ablation	エネルギー分布, 電離度等 の内部自由度空間構造
	突発的入力 相の急変・混在	圧縮波,衝撃波 相転移波 ビーム粒子	時間構造	two plume 衝突	内部自由度空間の発展 ラジエータとしてのエネル ギー放出機構
超高エネルギー 密度プラズマ	レーザー光強度 パルスと不均一	压縮波 航跡場	空間構造	光のコヒーレンスをプ ラズマの相関に転写 凍結	新物質(スーパーダイアモ ンド)の選択
	突発的入力	ビーム粒子	時間構造	電離励起非線形波競合 量子凍結	物質状態の記憶 新物質取り出し
電磁波非平衡	粒界	マイクロ波	空間構造	モード変換	界面と波動のマッチング
	波動ベクトル	超音波,スピン波	時間構造	アレニウス則拡張 凍結	反応の進む方向 非線形選択枝と確率統計

表3 物理過程からみた種々のプラズマへの普遍性.

		高エネルギー密度	ナノ・バイオ		
	磁化プラズマ	プラズマ	プラズマ	重相プラズマ	電磁波非平衡
遠隔相互作用	nonlocal interaction in transport ex, current drive control	radiation transport transcription of coherence from wave to particles	transcription of spatio- temporal pattern from wave to nano particles	transport by molecules	mode conversion from RF wave to other waves
構造の形成に於ける 集団運動や揺動の閾 値	structure formation in large scale 輸送障壁	onset of ionization	preferential reaction	'stagnation' above threshold	accelerated chemi- cal reaction
'隠れた変数'	H-mode における 径電場の意義の発見		ラジカルの時空不均一	carrier of momentum?	超音波等の励起
記憶、散逸との競争	memory of turbulence	超高圧状態物質の 取り出し	転写の固定		アレニウスの法則の 拡張
場の「共鳴」の条件 (マッチング条件)	非線形モジュレーショ ン結合に於けるマッ チング条件	非線形振動ミラーと 場の共鳴 多フォトン-原子 過程に於ける共鳴	界面での接続条件 ラジカルの選択	原子分子プラズマ 過程の時定数の差 が満たすべき条件 分子合成 パスの選択	粒界でのモード変換 条件

に通有の過程を描いていることがわかります. 超高圧状態 で新しい物質が生まれることは、予想されていると言えば 予想されているわけですが、それが常温常圧に取り出せる ということは大きな驚きです. それが往路と復路の違い と、時間的非平衡過程を活用していることは4章に説明し たところです. その考え方は、徐々に磁化プラズマ乱流の 遷移過程の研究に現れ始めています. もっと先を考えると 乱流の記憶が今後研究されることになります.構造やコ ヒーレンスの転写という考え方は、ナノ - バイオプラズマ や高エネルギー密度プラズマでは中心概念になっていま す. 位相空間でのコヒーレンスが高エネルギー密度プラズ マでは研究できるレベルにあり、その成果は、磁化プラズ マの乱流の理解も加速すると思います.最近の描像[7]に 示されたように、磁化プラズマの非線形現象は流体的観測 について大きな進展を示しましたが, [8]にありますよう に, 位相空間乱流の研究こそがプラズマ乱流の中心課題で す. 位相空間の構造観測へ向けて, 連携したシナジーを 持ってブレイクスルーを追求することが可能になっている と思います.

9. 終わりに

「非平衡極限プラズマ全国共同連携ネットワーク研究計 画」については、できるところから研究を進める、という 考え方に立って連携研究が実施されています.この報告で は、連携研究ネットワーク研究作業会当日の発表や議論を もとに、「非平衡極限プラズマ全国共同連携ネットワーク 研究計画」の連携研究の第一歩を紹介しました.特に、 個々のプラズマを対象として発展してきたプラズマ物理学 の方法論が、広いプラズマ全体に通有の普遍的問題に答え を与えうる、という事実に焦点を置いて説明しました.方 法のシナジーによる研究の加速について、当日の議論を基 に具体的な例の一端を紹介しました.今後とも順次連携に よるブレイクスルーを進め、報告する予定です.

更に広い物理科学分野全体を見ますと,「学術の大型施設計画・大規模研究計画(マスタープラン)に関する物理系シンポジウム」が2011(平成23)年1月31日に日本学術会議講堂で開催されました[27].そこでは,「プラズマ・核融合分野」が「素粒子・原子核分野」「天文・宇宙分野」「物質科学分野」と並んで四つの柱に取り入れられました. プラズマ・核融合分野が柱領域と認められたことは,プラズマ物理の学術的意義の評価の高まりの現れと言えましょう.そのシンポジウムでも,本研究の内容が物性物理や高エネルギー物理の研究者を刺激し,分野横断の議論を生み出しました.

本稿で紹介できたことの他にも、プラズマ物理科学の研 究では多くの企画が進んでいます。例えば、バイオプラズ マへの展開を見れば、熊本大学バイオエレクトリクスプロ ジェクトが推進されており[24,28]、プラズマ・核融合学 会でも「医療応用」プロセスのためのプラズマの学理をめ ざす提案が専門委員会に申請されています[29].応用プラ ズマでも、科学研究費新学術領域プロジェクトが実現し [30]、界面がナノサイズに縮小することにより顕在化する 相互作用の特長に焦点を絞って研究が展開し、そこにおい ても揺動制御をプラズマプロセスに活かす研究が進んでい ます.これらはいずれも学術的にはここで紹介した非平衡 プラズマの研究とも関連が深いものです.これら更に幅広 い研究との連携を通じて、「非平衡極限プラズマ全国共同 連携ネットワーク研究計画」の展開は、プラズマ物理科学 の関連諸分野を活性化すると思います.

謝 辞

本研究の推進と基盤の構築のために、科学研究費特別推 進研究(16002005),科学研究費基盤研究(22244072, 22224012,22246122,21654084,21224014,19360148, 19054001,18204055,18104011,13852016),科学研究費特 定領域研究「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科学」, 戦略的創造研究 CREST「高エネルギー密度プラズマフォ トニクス」,九州大学応用力学研究所共同研究,核融合科 学研究所共同研究の援助を受けましたことを感謝します.

参考文献

- [1] 伊藤公孝他:プラズマ・核融合学会誌 86 188 (2010).
- [2]日本学術会議提言「学術の大型施設計画・大規模研究 計画 一企画・推進策の在り方と マスタープラン策 定について一」 http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t90-2.pdf, http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t90-2-2.pdf
- [3] 文部科学省科学技術・学術審議会学術分科会研究環境 基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業 部会「学術研究の大型プロジェクトの推進について」 (平成22年10月27日).

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu4/toushin/1298714.htm

- [4]日本物理学会領域2・領域3合同シンポジウム「マイ クロ波テラヘルツ波による加熱の物理機構」(2010年9 月24日,於大阪府立大学)24pQA.
- [5] 非平衡極限プラズマ全国共同連携研究ネットワーク研究作業会(於:九州大学応用力学研究所・伊藤プラズ マ乱流研究センター2011年1月19日).
- [6] 仙台"プラズマフォーラム"平成22年度 東北大学電気 通信研究所共同プロジェクト研究会「プラズマナノバ イオトロニクスの基礎研究」(代表者:畠山力三).
- [7] 伊藤早苗: プラズマ・核融合学会誌 86,334 (2010).
- [8] P.H. Diamond, S.-I. Itoh and K. Itoh, *Physical Kinetics of Turbulent Plasmas* (Cambridge University Press, planned publication 2010) p.570.
- [9] A. Fujisawa, Nucl. Fusion 49, 013001 (2009).
- [10] A. Fujisawa *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 49, 211 (2007).
- [11] S.-I. Itoh and K. Itoh, Plasma Phys. Control. Fusion 43, 1055 (2001).
- [12] S. Inagaki et al., IAEA FEC 2010 EXC/7-4Ra.
- K. Itoh, K. Hallatschek and S.-I. Itoh, Plasma Phys. Control. Fusion 47, 451 (2005).
- [14] 兒玉了祐:「高エネルギー密度科学の新展開」パリ ティ 26, 19 (2011).

- [15] M. Nakatsutsumi, R. Kodama *et al.*, Opt. Letts. **35**, 2314 (2010).
- [16] N. Ozaki, T. Sano, S. Mashimo, T. Sano and R. Kodama, プラズマ・核融合学会誌 86,604 (2010).
- [17] RF 非平衡場を対象として特定領域研究「マイクロ波励 起・高温非平衡反応場の科学」(平成18年度から22年 度)が発足し成果を生み出している.http://phonon. nifs.ac.jp/
- [18] 伊藤早苗,佐藤元泰:プラズマ・核融合学会誌 85,636 (2009).
- [19] M. Tanaka, H. Kono and K. Maruyama, Phys. Rev. B 79, 104420 (2009).
- [20] A. Hassanein, Fusion Eng. Des. 60, 527 (2002).
- [21] K.A. Tanaka *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **76**, 013507 (2005);
 A. Lei, K.A. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 255006 (2006);
 N. Nakanii, K. Kondo, K.A. Tanaka *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 085101(2008).
- [22] K.A. Tanaka *et al.*, Invited talk at 19th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy (November 7-11, 2010, Las Vegas, Nevada), Fusion Sci. Tech. *to appear in* 2011.

- [23] 例えば, 畠山力三:「カーボンナノチューブを含むプラ ズマシステム」パリティ 24,18 (2009).
- [24] 例えば,秋山秀典:「プラズマと生命体との相互作用」 パリテイ 25,31 (2010).
- [25] R. Hatakeyama: "Novel gas-liquid interfacial plasmas basic properties and applications to nano-bio material creation" (36th EPS Conference, Sofia, 2009) I4.066.
- [26] R. Hatakeyama and T. Kaneko, Plasma Fusion Res. 6, 1106011 (2011).
- [27] 伊藤早苗:「学術の大型施設計画・大規模研究計画(マ スタープラン)に関する物理系シンポジウム」プラズ マ・核融合学会誌 87,247 (2011).
- [28] 熊本大学グローバル COE プログラム「衝撃エネルギー 工学グローバル先導拠点」http://ppe.coe.kumamoto-u. ac.jp/
- [29] プラズマ・核融合学会専門委員会「プラズマ科学の医 療応用」代表者 大阪大学 浜口智志
- [30] 新学術領域「プラズマとナノ界面の相互作用に関する 学術基盤の創成」代表者 九州大学 白谷正治:http:// plasma.ed.kyushu-u.ac.jp/~plasmanano-pj/