

プロジェクトレビュー

# プラズマ乱流と RF 非平衡場の科学

伊藤早苗,佐藤元泰<sup>1)</sup> 九州大学応用力学研究所,<sup>1)</sup>核融合科学研究所 (原稿受付:2009年7月21日)

プラズマ乱流の非平衡系物理として、科学研究費特別推進研究「乱流プラズマの構造形成と選択則」・基盤 研究S「乱流プラズマの動的応答と動的輸送の総合研究」のようなプロジェクト研究が展開している.一方、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」が成果を生み出している.こ のプロジェクトレビューでは、プラズマ乱流とRF非平衡反応場の研究プロジェクトを横断して描き、非平衡科学 という観点から共通性やアナロジーを述べ、今後の展開を駆動する.

#### Keywords:

far-nonequilibrium system, plasma turbulence, excitation by RF fields, joint review, selection rule, transition probability, RF reduction, collective response of spin

# 1. はじめに

実験室や自然界のプラズマは非平衡状態にあり,プラズ マダイナミックスの理解やプラズマ閉じ込め制御を目指し た研究において,非平衡系の科学が展開されてきた[1]. プラズマ閉じ込め研究では,大きな温度勾配を維持すると いう実空間の不均一性をめざし,また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活用する等, 強い非平衡状態を維持することが追求されている.同時 に,乱流のような非平衡現象を理解し制御することが探求 されている.材料や新機能物質創生研究の領域では,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・高機能化という研究潮流が生まれている[2].さらに 広い物質創生研究の大海の中で,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る[3].

こうした研究潮流の中で,プラズマ乱流の非平衡系物理 としては,科学研究費特別推進研究「乱流プラズマの構造 形成と選択則」(平成16年度から20年度)・基盤研究S「乱 流プラズマの動的応答と動的輸送の総合研究」(平成21年 度から25年度)のようなプロジェクト研究が展開している [4,5].一方,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.このプロジェ クトレビューでは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く. 具体的には,(熱平衡の等分配状態とは異なり)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こと,反応や遷移の加速 等々,性質やダイナミックスを理解する共通の切り口を定 式化できる.相互啓発を進め,今後の展開の礎とすること を試みる.

### 2. 平衡系

最初に熱平衡系の特徴を掲げ,それとの異同の形で,次 章以降にこの稿で考える「非平衡系」の特徴を描く.

熱平衡系では,系は均一であり性質が均一な領域が「相」 として捉えられる.緩和を考えるにしても,不均一性は微 小の場合に限られる(輸送をもたらす微視的な相関長が勾 配長よりずっと短い).ミクロな揺動場に着目すると,熱 平衡状態では,等分配則に従って揺動が励起される.その ため拡散型の輸送現象(流束がその場の勾配に比例)が生 まれ,輸送係数はシステム・サイズに依存しない.化学反 応等,二状態の間の状態遷移は,熱励起で進む.その結果, 反応が進む速度はアレニウスの法則に従う.

反応速度 ~ exp[-Q/T] (1)

(T は温度). こうした特徴を表1にまとめておく.

# 3. プラズマ乱流

自然界や実験室のプラズマは、のっぺりした実態ではな く、様々な構造が見られ、形や不均一性が生々流転する世 界である.線形応答の中核をなす久保理論[6]からの50年 は、ちょうどプラズマ物理の50年の発展にも呼応してい る.その機会に[1]において非平衡統計力学の側面からプ ラズマの乱流の特徴を説明した.

揺動場によって巨視的な輸送が誘起され,巨視的(観測 される)プラズマのパラメータや電磁場が発展する.磁気 面を横切るプラズマのエネルギー流束 *q*<sub>r</sub> は

Science and Technology of Plasma Turbulence and Non-Equilibrium Reaction Fields ITOH Sanae I. and SATO Motoyasu

corresponding author's e-mail: s-iitoh@riam.kyushu-u.ac.jp

Project Review

$$q_{\rm r} = \langle \tilde{v}_{\rm r} \tilde{p} \rangle \tag{2}$$

( $\delta_r$ :密度勾配方向の速度の揺動, $\hat{p}$ :内部エネルギー揺動, $\langle ... \rangle$ は磁気面上の時間平均)と表される. 揺動場は, プ ラズマの不均一などが起因となり,特徴的なスケール長の 揺動にエネルギーが注ぎ込まれ,揺動間のエネルギー配分 が発展し,それに応じた巨視的な輸送がもたらされる. 揺 動が発達して(2)式に示すように輸送量が増えるとして, その結果不均一性が消失するだけであれば,結局は平衡状 態へ近づくと推論される. しかし実際は,揺動の発達が構 造や不均一性を維持・生成する. こうした機構がプラズマ の中に働くため,均一で熱平衡状態へと緩和するだけでは なく,多彩な構造が生成誘起され構造相転移ダイナミクス が起きる[7]. 代表的な揺動と構造を図1(a)に例示する. **表1**にまとめた熱平衡状態との違いに着目して,プラズマ 乱流の様相を説明しよう.

#### 3.1 Like-scale 非線形効果

揺動の非線形現象のなかで、類似の波数のモード同士で エネルギーをやり取りすることでスペクトル $E_k$ が発展す る過程をlike-scale非線形結合と呼ぼう.二次元の圧力駆動 プラズマ乱流では、乱流へのエネルギー注入が不均一性に 起因する不安定性であることを反映し、like-scale 非線形結 合で定まる定常スペクトルについては、圧力勾配  $\nabla p$  にも 依存する

$$E_{\mathbf{k}} \sim |\nabla p| k^{-3} \tag{3}$$

というような結果が示されている[8]. 揺動の励起が熱平 衡の等分配とかけ離れたものであること,「勾配」が鍵を 握るパラメータであることが特に重要である.

#### 3.2 巨視的・メゾスケール構造とミクロ揺動の干渉

不均一な圧力勾配は揺動を作るが,不均一な巨視的電場 があると,乱流や乱流輸送を抑制する.巨視的不均一性の 中で,電場や速度の不均一が乱流輸送を減らしうる.この 過程が卓越すると,輸送が低下し,巨視的不均一が強まり, ますます乱流輸送が低下するという正帰還のループが働く [7].そのため,乱流輸送に支配されている系では,乱流揺 動と巨視的分布で特徴づけられるプラズマの構造に遷移が 生まれることが理解される.近年の研究はメゾスケール揺 動の重要性に焦点を当てている.特に,帯状流の研究が展 開している[9,10].メゾスケール揺動を繰り込むことを契 機にプラズマ閉じ込め研究の理解が深まっている.



図1 プラズマ乱流にあらわれる種々の構造と揺動(a), RF が拓 く非平衡科学の諸過程(b).

理論・シミュレーションのみならず,乱流に於ける非線 形結合過程が実際に実験によって実測されるというめざま しい進歩が見られている[5,11,12].帯状流やストリーマ (揺動がポロイダル方向にバンチしたもの)がトロイダル プラズマのなかで存在していることや,それらの間の高次 の非線形結合の実態が実測された[13].ついには,メゾス ケール・ダイナモ現象の存在も実験室プラズマで実証され た.帯状流やダイナモ磁場の生成とは,スカラー場の圧力 勾配から乱流を介して巨視的構造を持った軸性ベクトル場 が生み出されるものである.プラズマの遠非平衡的特性を 決める根源的な過程であり,乱流が構造を持った流れや磁 場を生み出していることを証している.

#### 3.3 乱流構造の遷移と選択則

乱流状態の中に自律的プロセスによって複数(多数)の 不均一構造が維持されるとすると,乱流がもたらす非線型 乱雑力が遷移の確率的誘起をもたらす.片方から他方への

	熱平衡系	プラズマ乱流	RF 非平衡場
構造・勾配	均一	磁気面を横切る不均一	微粒子, 粒界, 微結晶
摇動源	熱揺動	不安定性	RF 波動
揺動レベル	等分配	非線形バランス	RF 励起,素励起
輸送機構	拡散	乱流輸送	音波・電磁波・素励起による
輸送の性質	サイズ非依存	スケール依存,非拡散的	構造依存性あり
最尤状態	自由エネルギー最小	非線形選択則	RF 場に依存
	(エントロピー最大)		
遷移確率	アーレニウス則	乱流遷移確率	RF 場に依存

表1 熱平衡系との比較

遷移の時定数や,大局的に見てどの状態が選ばれるのか等 のルールが乱流機構によって定まっている.

非線型効果を,着目するモード(運動)に対してコヒー レントな効果-Af(fは揺動場)と乱雑なノイズ効果R とに区分する.コヒーレントな効果に着目し,乱流をくり こんだ非線型分散関係方程式から非線型な自己無撞着状態 を求める.この解は多重解を持ちうる.乱雑力Rに着目し, 非線型な自己無撞着状態の間の遷移を研究する.

実験観測にかかる量 X の選択則を考える. 揺動のマルコ フ近似が許される場合, 乱雑力をホワイトノイズで近似す る (強度 G). 非線形散逸率を表すポテンシャル関数

$$S(X) = \int^X 4AXG^{-2} dX \tag{4}$$

を導入する.例えば極小が二つある場合,関数の極小値を もたらす $X = X_L \ge X = X_H$ が定常状態として実現できる候 補になり、中間の $X = X_m$  での極大値によって隔てられて いる.非線型ノイズによって自律的な状態の間の遷移が起 きる.乱流によって遷移確率が高まる.状態 $X = X_L$ から  $X = X_H$ への遷移確率は

$$r_{\rm L \to H} = (2\pi)^{-1} \sqrt{A_{\rm L} A_{\rm m}} \exp(S(X_{\rm L}) - S(X_{\rm m}))$$
(5)

で与えられ ( $\Lambda_{L,m,H}$  は $X = X_{L,m,H}$  での $\Lambda_{L,m,H} = 2X | \partial A / \partial X |$ ), その逆数が状態の寿命を与える.長時間平均した場合,  $X = X_L \ge X = X_H$  の実現する確率が等しくなる条件は

$$S(X_{\rm H}) = S(X_{\rm L}) + \frac{1}{2} \ln(\Lambda_{\rm L}/\Lambda_{\rm H})$$
 (6)

で与えられる.この結果から選択則が導かれる.パラメー タ空間での相境界は(6)式で与えられる.

これらのプラズマ乱流の特徴を平衡系と比較して**表1**に 対比する.

#### 4. RF 非平衡科学

#### 4.1 動機と研究展開

「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科学」の多様な 課題と成果[3]の中で,本稿ではRF非平衡科学という観点 から研究プロジェクトを説明する.このプロジェクトで は,プラズマ・核融合実験で培われたRF場の理解やRF 技術,特に高パワーRF波動技術を物質創成に適用する研 究が推進されている.プラズマを使った物質創成で低温プ ラズマを制御する研究が例えば[2]にあるように精力的に 展開しているが,それらと補完的に,本プロジェクトでは 高パワーRF波動を活用して新機能物質創成を試みる.高 パワーRF波動をエネルギーキャリアとして使うとともに, RF波動には電場・磁場という二種の場が伴っているので, 場の個性を活用する道も拓ける.

このプロジェクトでの学術的研究目的は、(i)マイクロ波 (低エネルギー光子)による物質加熱・焼結の過程とそれ が発生する物理機構の解明 (ii)In-situ (リアルタイム) 実 験によるデータ蓄積,および実験と連携した理論研究,新 たな物性領域の開拓,に焦点を置いている.これらの課題

#### と関連を図1に概説する.

ここで対象とする物質は, 微結晶や微粒子塊等, 界面や 粒界を含む非均質物質状態にある.素材としては, 酸化鉄 などの酸化物や金属微結晶質を対象としている.研究目標 は, 〇微粒子焼結や微結晶塊, ガラス金属などの構造制御, 〇酸化鉄系の磁性機能制御や焼結技術の確立, 〇酸化物の 高機能還元, などの動機によって策定されている.酸化鉄 の還元の問題を例にして説明しよう.製鉄炉では酸化鉄は 炭素によって還元される. 例えば

 $2Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 4Fe + 3CO_2$ 

のように反応が進むが、還元のために必要なエネルギーは コークスを燃やすことでもたらされているので、還元に よって生まれる二酸化炭素と倍量程度の二酸化炭素が生ま れる.結局

 $2Fe_2O_3 + 6C + 3O_2 \rightarrow 4Fe + 6CO_2$ 

のように,鉄1モルあたり二酸化炭素1.5 モル程度が発生 する.古代の「たたら」ではこの数倍の二酸化炭素が発生 した.現代の最大の課題である炭酸ガス発生の削減には, 製鉄に伴う二酸化炭素削減が必須であり,製鉄での還元効 率の向上が人類にとっての大きなチャレンジである.RF 非平衡科学プロジェクトでは,酸化鉄と炭素の混合物に RF 波動を伝播させ,最少の炭酸ガス発生で製鉄する道を 探索・開拓している[14].

微粒子群に強い RF 波動場を伝播させることも鍵となる 課題である.連続した,ひとかたまりの金属の中では表皮 長より深く RF 波動場を伝えることはできない(マイクロ 波では数µmのオーダ).しかし,微粒子を集積したバルク 材では RF 波動場を1 cmのオーダで伝播させることができ る.微粒子群の中の波動伝播について集中的な研究が進め られている[15].

焼結が起きるときには、粒界が一部消失する. 微結晶や 微粒子の粒界変化は RF 非平衡場の中心的課題である. 融 解が起きればもちろん粒界が消失するが, RF 非平衡場で 取り扱う対象には、巨視的な溶融を起こさずに粒界変化が おきる. アナロジーを挙げれば、過冷却の場合には凍結・ 融解が融点以外の温度で起きるように、非平衡状態では、 融点とは異なる温度で融解を経ずに粒界変化が発生する.

本章に「低エネルギー光子」という言葉を用いたことを 振り返り,説明を付加したい.プラズマの世界になじみの 多いものでは例えば光電子放出や荷電交換分光などに見ら れるように,光子が電子とエネルギーを交換して状態を変 えることが様々に起きる.光の波長が可視光やさらに短い 場合は,量子化された一光子あたりのエネルギーが,電子 のエネルギー状態を変えるにふさわしい大きさになる.一 方,RF 波動 (マイクロ波)では,一光子のエネルギーは極 端に小さく,還元等の反応に必要なエネルギー閾値(一分 子あたり eV 程度)よりずっと小さい.その結果,原子・分 子の集団的応答が反応の進展を左右する.その意味から, プラズマ乱流等の問題との類似や相互啓発が重要になって くる.

#### 4.2 非平衡科学としての特徴

微粒子の集った塊にマイクロ波を印加することで,新機 能物質を作り出すプロセスでは,図1(b)に掲げたような 様々な過程が問題となる.本稿では,非平衡科学としての 側面から研究を描くことをめざしているので,表1に沿っ て特徴を説明する.

#### a.構造と非均一

RF 電磁場とともに非平衡構造を作り出す微粒子塊とし ては, 微結晶や非晶質の粉粒体, 金属粉末塊, 多孔質物質, 焼結体等を対象とする. RF場がかからなければ, 空間的に はざくざくしているものの, 全体として等温の熱平衡状態 を取る. RF 電磁場には磁場を伴うので, 磁区構造を持って いる場合も特に重要視する.

RF 電磁場を印加することによって,強い非平衡状態が 実現される.RF場には電場と磁場が伴っており,キャビテ イなどを使って定在波を作れば,RF磁場が集中する位置 とRF電場が集中する位置を分けることができる.試料を, 定在波のどこに置くかによって,「場」に対する選択的な 応答を観測することができる.(図2)

図3に挙げたものは、酸化鉄のマグネタイトおよびヘマ タイトの微粒子を混合させたものにマイクロ波をかけた例 である[16]. 一つの粒子の大きさはオーダ 0.1 mm 程度で ある.マグネタイトは磁性を持ち,ヘマタイトは持たない ので、マイクロ波にそれぞれ異なった応答を示す. この例 では, 試料はRF磁場が集中する位置に置かれており, 磁場 に対する敏感性を明確に示している. RF 加熱されている 資料のその場観測が実現し,明るく光るところ(強く加熱 されるマグネタイト)と暗いところ(ヘマタイト)では100 度以上の温度差が生まれている. 1万度/mm に近い強い 温度勾配が生まれている.図3には、トーラスプラズマの 輸送障壁の例[17]を一緒に挙げている。閉じ込めプラズマ では1億度/m(すなわち10万度/mm)以上の温度差が 保たれる. 図3(a)の場合の温度差は固体密度で定常に維 持されていることを考えれば大きなエネルギー密度の非平 衡状態であることがわかる.

#### b. 励起場

この例に見られるような温度差は,RF 波動の伝播・吸 収と緊密に結びついている.粉体や微結晶等の大きさや集 合の状態によって波動の伝播や励起が変化し,その結果 は,エネルギー注入のパターンを変える.

RF 波動の伝播や吸収の問題の例としては,金属微粒子 塊の伝播問題が世界中で研究されている.例えば,一粒の 微粒子サイズが,RF 波動の表皮長より短い場合から長い 場合まで,様々な性質を示す.一粒の粒子によって電磁波 がどのように散乱・透過・吸収されるか微細に解析されて いる[15].さらに,微粒子同士の協同的応答があるので (微粒子サイズを超えた)大域的応答を考察し吸収率の密 度依存性が求められている.

前節に集団的応答の重要性に触れたが、ターゲットに励 起される電磁場を理解する上で、電子やイオンの集団運動 が本質的である。特に磁性の有無によって極端な加熱率の 差をもたらしたこと[3,16]は、スピンの集団的応答が本質





図2 導波管の中に定在波を励起し場を選択的に活用する反応炉. (a)概念図と(b)内部に励起される電場と磁場の強度分布. 試料の位置を変えて,場を選択する.(c)実験装置の鳥瞰図.



100ミクロン

図3 (a)マイクロ波を照射されている金属酸化物粉体. 試料は 導波管内で磁場最大(電場ゼロ)点に置かれ、明るく輝く 部分は磁性を持つマグネタイト、暗い部分は磁性を持たな いへマタイト. 温度勾配は、1万度/mm 程度に達する. (b)輸送障壁を伴うプラズマの温度分布. 温度勾配は10万 度/mm 以上に達する. (a)は固体密度であるので、エネ ルギー密度勾配で見て極端な非平衡状態にあることがわか る.

的役割を果たしていることを示唆する.この仮説を検定す るため,集団的応答に課題の焦点を絞って,イジング・モ デルによってスピンの巨視的な応答をシミュレーションで 研究した成果を簡単に紹介する.マグネタイトやヘマタイ トの原子構造を正確に取り入れて計算することにより,巨 視的応答としては,自発磁化が温度とともに消滅する相転 移現象を再現する.そこで RF 波動 (定在波の磁場成分)を 印加すると,マグネタイトではスピンが集団的に位相をそ ろえて応答し,集団的スピン振動が励起される.スピン波 の緩和が起きるように、スピン振動はエネルギーを熱に換 える.予想されたように、転移温度近傍でスピン波動応答 が大振幅になり、転移温度近傍での強い吸収を示している (図4)[18].

不対電子スピンがマイクロ波磁界により摂動を受けるこ とがマイクロ波磁界加熱の基本であるというこの理論予測 を実証するための系統的な実験を行っている.また,マグ ネタイト粉末の誘電率・透磁率の周波数依存および温度依 存をネットワークアナライザの微少電力とおよび1.5 kW のマイクロ波キャビティで測定した.マグネタイトの誘電 率と透磁率の実部および虚部はいずれもキューリー点で最 大となり,その後は減少した.また周波数依存も2 GHz で最大を示し,理論予測とよく一致している[19].

このように熱平衡状態とは異なった励起場が作られてい ることが RF 非平衡科学の大きな特徴である.

## c. 反応速度

熱平衡状態では、還元や組成変化等の反応はアレニウス の法則に従って進む.すなわち、温度が制御パラメータと なって反応の進行が決まっている.また触媒のような媒質 を介在させ、中間物質へのエネルギーバリアを下げること ができれば反応速度は速くなる.

RF 非平衡反応場では,新たな自由度を用いて反応率を 変化させ生成物を制御する研究が展開している.前記b. 項に書いたような集団的励起が生まれうるとしよう.そう すると,素材に(例えば酸素含有率の)揺らぎがあれば,そ の揺らぎに応じて電磁場の集団応答が局所的に変動する. 局所的なエネルギー集中は非均一な酸素原子の移動をもた らし,場と酸素濃度変動の結合過程によって平衡系とは異 なる反応進展を生み出しうる.この例に限らず,様々な非 均一系であるが故に可能となる反応パスが生まれ,平衡系 の反応率とは異なる速さで反応が進む.

#### d. 選択性

前項b. に説明したように,様々な状況で RF 波動の電場 か磁場かに依存して,系のダイナミックスが大きく変化す る.電磁場のどの成分に応答するかという顕著な選択性が 現れる.また,相転移温度近辺での温度に敏感な加熱率等 も,反応の選択性を現している.さらに還元等の反応が進 めば,内部の組成がどのように選択されるかという選択性 の問題の核心に迫ることができる.

詳細は今後の論文に譲るが,酸化鉄の RF 波駆動反応の 場合を例として概観しよう.平衡での相図は,図5に示す ようなものになる.酸素の含有量の異なる相が順次現れ る.相境界が図に示されているが,温度がコントロールパ ラメータになっている.マイクロ波磁場加熱を行った結 果,X線回折プロファイルよりFeOの出現が確認された [20].微粒子塊の中で作られる RF 場は,例えばb.項に描 いたような選択的励起があって,磁区や粒界に遮られた不 均一励起状態となる.そのため,運動学的なエネルギー密 度が,組成の空間構造や励起場の集団的応答構造を反映し た非均一分布を持つ.そこで,次のように作業仮説を立て ている.粉末試料内に元々存在していた酸素イオン濃度の ゆらぎがあるが,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>と酸素の少ない領域においてマイ



図4 マグネタイト磁性のハイゼンベルクモデルによる理論評価.シミュレーヨンに見るスピンの集団的応答(a).マイクロ波磁場による磁性体の加熱の温度依存性の計算結果(b).強磁性のマグネタイトは●,磁性が弱いヘマタイトは△で示す.また線形応答により求めた帯磁率をマグネタイトについて◎で示す.臨界温度付近にピークを持つ加熱率が説明される.([18]を参照.)



クロ波磁場に対する応答(振動)状態が異なり,酸素イオンの局所的な移動を伴ってこの相分離をさらに助長させた ものと考えられる.今後の検証の課題である.

温度のみによる一元的決定ではない,組成の選択が起きる.

以上4項目について、「非平衡系科学・非平衡物理学」 という観点から、RF 非平衡反応場の研究プロジェクトを 紹介した.表1に沿って対照を説明した.

## 5.展望

この原稿ではプラズマ乱流と RF 非平衡反応場の二つの 研究プロジェクトを横断して描き,非平衡系科学という観 点から共通性やアナロジーを考えた.**表**1に整理されたよ うに,熱平衡の等分配状態とは異なって揺動が選択的に励 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こと,反応や遷移の加速など,性質や ダイナミックスを理解する切り口を定式化できる.相互啓 発が活発に行われている.

「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科学」研究プロ ジェクトは,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ている.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, 非平衡系科学にとっても大きな刺激を与えている.実験結 果を対象として,非平衡構造,非平衡励起,非平衡反応の 三つの方向から物事を眺めると,プラズマ閉じ込めで慣れ 親しんできた揺動の選択的励起や非平衡性に伴う構造形成 等と理解を共有できることがわかってきた.核融合関連研 究で発達した RF 科学技術を活用することで「マイクロ波 励起・高温非平衡反応場の科学」研究プロジェクトが開か れたが,非平衡を生む機構の解明を通じて,閉じ込めプラ ズマの様々な過程を理解する上での刺激を与えている.

このジョイント・プロジェクト・レビューとも呼ぶべき 報告では、一見かけ離れたように見えるプラズマ乱流の研 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 とって、非平衡科学という観点からアナロジーや普遍性を 抽出できることを説明した.そしてそれによって相互啓発 が生まれる.今後の展開の礎とすることを試みた.対流や 揺動場の制御の重要性という視点はこの二つの例に限らな い[21].対象や方法が異なる研究群が学問的方法論を共有 することで、一層豊かな研究領域が開拓できるだろう.

# 謝 辞

本稿の内容は,科学研究費特別推進研究「乱流プラズマ の構造形成と選択則」(16002005)・基盤研究S「乱流プラ ズマの動的応答と動的輸送の総合研究」(21224014)ならび に特定領域研究「マイクロ波励起・高温非平衡反応場の科 学」(領域番号465)の成果に基づくものです.共同研究者 の皆様に負うところが大きいこと,とりわけ,本稿をまと めるにあたって,伊藤公孝・田中基彦両氏の助力を受けまし たこと,飯吉厚夫先生に激励をいただきましたことを感謝い たします.

## 参考文献

- [1] 伊藤公孝, 伊藤早苗: 日本物理学会誌 63, 785 (2008).
- [2] 例えば, 畠山力三:パリティ 24,18 (2009).
- [3] http://phonon.nifs.ac.jp/
- [4] 伊藤早苗: プラズマ・核融合学会誌 81,212 (2005).
- [5] 伊藤早苗:プラズマ・核融合学会誌 83,241 (2007).
- [6] R. Kubo, J. Phys. Soc. Jpn. 12, 570 (1957).
- [7] K. Itoh, S.-I. Itoh and A. Fukuyama, *Transport and structural formation in plasmas* (IOP, England, 1999).
  A. Yoshizawa, S.-I. Itoh and K. Itoh, *Plasma and Fluid Turbulence* (IOP, England, 2002).
- [8] e.g., C.W. Horton, Rev. Mod. Phys. 71, 735 (1999).
- [9] P.H. Diamond, S.-I. Itoh, K. Itoh and T.S. Hahm, Plasma Phys. Control. Fusion 47, R35 (2005).
- [10] K. Itoh, S.-I. Itoh, P. H. Diamond, A. Fujisawa, Y. Nagashima *et al.*, Physics of Zonal Flows in *Turbulent Transport in Fusion Plasmas* (AIP, 2008) AIP Conference Proceedings 1013, pp.106-126.
- [11] 伊藤早苗:パリティ 23,6 (2008).
- [12] 藤澤彰英:パリティ 24,16 (2009).
- [13] A. Fujisawa, K. Itoh *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 165002 (2004). A. Fujisawa, K. Itoh *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 165001 (2007); T. Yamada, S.-I. Itoh *et al.*, Nature Phys. **4**, 721 (2008).
- [14] K.Nagata, Innovation of iron making by maicrowave heating, Proceedings of Global Congress on Microwave Energy Applications, p.273, Keynote Lecture (2008).
- [15] M. Ignatenko, M. Tanaka and M. Sato, Jpn. J. Appl. Phys., 48, 067001 (2009).
- [16] M. Sato, N. Nishi, M. Tanaka, A. Matsubara, S. Takayama, H. Fukusima, M. Ignatenko, R. Roy, D. Agrawal and J. Fukusima, Formation of Nano-Domains by Microscopic Thermal Non-Equilibrium Generated in GHz High Frequency Microwave Field, in Proc. 1st Global Congress on Microwave Energy Applications, O2-38 pp491, Otsu, Japan (2008).
- [17] K. Ida et al., Phys. Rev. Lett. 91, 085003 (2003).
- [18] M. Tanaka, H. Kono and K. Maruyama, Phys. Rev. B 79, 104420 (2009).
- [19] M. Hotta, M. Hayashi, A. Nishikata and K. Nagata: Complex permittivity and permeability of SiO<sub>2</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> powders in the microwave frequency range between 0.2 and 13.5 GHz, ISIJ International, Vol.49(2009), No 9 in press.
- [20] N.Yoshikawa, Z.Cao, D.Louzguin, G.Xie, S.Taniguchi, J. Mater. Res. 24, 1741 (2009).
- [21] 例えば気液界面プラズマの研究に於いても、流体の対流や 揺動を制御する重要性が示されている. R. Hatakeyama, "Novel gas-liquid interfacial plasmas - basic properties and applications to nano-bio material creation" (36th EPS Conference, Sofia, 2009) I4.066.