



プロジェクトレビュー

非平衡極限プラズマネットワーク構想

—プラズマ物理科学の新しい研究体制—

Concept of Research Network on Non-Equilibrium and Extreme State Plasma - New Research System of Plasma Physical Science -

藤澤彰英^{1,2)}, 伊藤公孝^{1,4)}, 伊藤早苗^{1,2)}, 上杉喜彦^{5,6)}, 大野哲靖⁷⁾, 金子俊郎⁸⁾,
兒玉了祐^{1,9,10)}, 白谷正治^{1,3)}, 田中和夫⁹⁾, 畠山力三^{1,8)}, 浜口智志^{9,11)}, 米田仁紀¹²⁾
FUJISAWA Akihito^{1,2)}, ITOH Kimitaka^{1,4)}, ITOH Sanae-I.^{1,2)}, UESUGI Yoshihiko^{5,6)}, OHNO Noriyasu⁷⁾,
KANEKO Toshiro⁸⁾, KODAMA Ryosuke^{1,9,10)}, SHIRATANI Masaharu^{1,3)}, TANAKA Kazuo A.⁹⁾,
HATAKEYAMA Rikizo^{1,8)}, HAMAGUCHI Satoshi^{9,11)} and YONEDA Hitoki¹²⁾

¹⁾九州大学伊藤極限プラズマ研究連携センター, ²⁾九州大学応用力学研究所,

³⁾九州大学プラズマナノ界面工学センター, ⁴⁾核融合科学研究所, ⁵⁾金沢大学工学部,

⁶⁾金沢大学工学部サステナブルエネルギー研究センター, ⁷⁾名古屋大学大学院工学研究科,

⁸⁾東北大学大学院工学研究科, ⁹⁾大阪大学大学院工学研究科, ¹⁰⁾大阪大学光科学センター,

¹¹⁾大阪大学アトミックデザイン研究センター, ¹²⁾電気通信大学レーザー新世代研究センター

(原稿受付: 2013年11月6日)

Keywords:

non-equilibrium, extreme state plasma, network research, magnetized turbulent plasma, laser induced plasma,
functional plasma, synergy

1. はじめに —非平衡と極限プラズマ

20世紀の物理研究の幕開けは、「物理学の行方に黒雲が立ちこめている」というケルビン卿の言葉で始まった。当時、エーテルと固体比熱の問題があり、この問題は相対論と量子論の出現によって解決された。さて21世紀はどうであろう。宇宙の99%の物質はプラズマであるといわれた時代も去り、ダークマターやダークエネルギーなど未知の物質に満ちているといわれる時代である。ヒッグス粒子の同定もそこまで来ている。究極の物質の探求は相当なところまで到達されたといってよいのではないだろうか。未知なるチャレンジはといえば、この宇宙にみられる諸存在がどのように発展していくか、という根源的問題である。

さて、究極の物質がわかって、どのように宇宙が発展していくのか、地球磁場ができるのか、生命の機能がどのように発現されるか、などの問いに答えるためには別の視点が必要である。わかればわかるほどダイナミクスは失われていく。要素と変化の法則が理解されたとき初めて自然を理解したといえる。平衡にあるものは安定であり変化しない。非平衡は自然の変化のダイナミクスを司る。緩和時間より短い時間内の観測においては、観測対象である系は常に非平衡状態として定義づけられるし、エネルギー・粒子・運動量の流れの存在する系には勾配が存在し非平衡状

態にあるといってよい。現代の統計力学は平衡状態を扱うことでは十分に成功を納めている。しかしながら、「非平衡開放系の構造や機能性の発現」は21世紀の我々に託された課題である。

多くのプラズマは非平衡状態にある。実験室でプラズマを維持するにはエネルギーの流入が必要であって平衡から遠い状態にある。その特性として遠非平衡系、その結果として強非線形性によって特徴づけられる。そのダイナミクスには荷電粒子の協同集団的性質（あるいは流体的性質）、個別粒子の性質が現れ、階層性の枠を超えた構造形成が機能発現を司っている。プラズマは、 10^{-5} から 10^{22} m, 10^{-10} から 10^{14} 秒というきわめて広い時空間スケールで観測され、宇宙から極微の領域まで自然界の至るところに存在する。ハッブル望遠鏡の像は遠い銀河をみせてくれ、一時、宇宙へと想像をかき立ててくれる。毎年何千人もの日本人がオーロラを見るために寒い冬に北欧に出かけていく。天体画像も揺らめくオーロラのカーテンもまたプラズマでありその発光を見ているわけである。宇宙を理解するためには我々が観測しているプラズマのダイナミクスをまず理解しなければならない。クォーク・グルーオンプラズマなど極微の多体系のダイナミクスも降着円盤など重力系のダイナミクスも、たとえ相互作用の形は違っても、プラズ

Corresponding author's address:

Advanced Fusion Research Center, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Kasuga, FUKUOKA 816-8580, Japan

Corresponding author's e-mail: fujisawa@triam.kyushu-u.ac.jp

マのダイナミクスはその雛形として学術的な高い価値を有する。

プラズマはその密度、温度で特徴づけた場合、広いパラメータ領域にあり性質も様々であり、実験室では色々な領域のプラズマが研究されてきている。しかしながら「**極限の追求**」は科学の常道である。平衡系での例として極低温において金属は超伝導性を示す。また、超高磁場の下で物質は隠れた姿を垣間見せ、我々の自然認識を広げる上で役立つ。プラズマにおいても極限的な性質を研究することで隠れた性質を知ることができる。非平衡極限プラズマネットワークが提案されている[1]。非平衡物理そのものが扱う対象はきわめて広い。大規模プロジェクトとして非平衡極限プラズマ研究を推進すべき理由としては、プラズマの学理の普遍性と先進性およびその広い応用性にある。プラズマはこれから述べるように理学他、天文学、工学はもちろんのこと、農学、医学、薬学などきわめて広い産業応用があり、また新たな革新的な産業応用が期待されている。それゆえ、非平衡物理学としてプラズマの研究を進め、実験室で法則を検証し、その学理をすぐさま様々な応用へとつなげることができる研究体制は望ましいものであろう。以下、このプロジェクトレビューでは、「非平衡極限プラズマ研究ネットワーク」の概要について報告する。

2. プラズマの諸分野

このネットワーク計画では、幅広いプラズマの分野を、そのアプローチの違いから「磁化乱流プラズマ」、「超高強度光場プラズマ」、「機能性プラズマ」の3つの領域に大別して研究を展開する。そしてそれらを統合する研究を実施し、シナジーによる個々の分野の研究加速と普遍化された学理の実現をめざす。図1にその概念図を示した。

2.1 磁化乱流プラズマ

核融合をめざしてプラズマの閉じ込め研究が国際的に行われてきた。プラズマの乱流研究で日本は大きな貢献をなしてきた。20世紀には、ドリフト波の集合体とみなされていたが、現代ではドリフト波から作られる帯状流が発見さ

れたことで、プラズマ乱流はドリフト波と帯状流からなる系とする新しい見方が生まれている[2,3]。帯状流は磁気軸に対称な流れで輸送に寄与しない。よってプラズマの不均一性から生まれる自由エネルギーがドリフト波の他に帯状流に分配されることで磁場を横切る輸送が軽減されることになる。ここで熱平衡にある場合に比べると、励起されているドリフト波の強度は 10^{11} 倍と圧倒的に高いレベルにある。また、いうまでもないことだが、乱流状態では乱流を構成する成分の波が動的に非線形結合しその状態が維持されている。

さらに、ドリフト波に励起されるより大きな揺らぎの構造がみつかった[4]。帯状流の場合トーラス方向には対称であるが、半径方向にはメソスケールの波長をもつ帯状構造である。それに対して新しくみつかった揺らぎ構造は、ドリフト波から励起されていることが示され、半径方向にほぼプラズマの中心から端にまで渡る特性長をもつ巨視的な構造である。この発見によって、ドリフト波と帯状流の系としてみなされたパラダイムはさらに、ドリフト波とドリフト波が作るメソ、マクロの揺らぎ構造の系への拡張を余儀なくされている。また、ドリフト波同様、熱平衡状態に比べ励起されている帯状流の強度は圧倒的に大きく 10^{14} 倍と評価され、極限的なレベルにある[5]。この認識の飛躍により、プラズマ乱流の研究は新しい時代に入るといえる。

Hモードの発見に始まる輸送障壁は、電場の界面に形成されることがわかっている。我々は、新パラダイムの確立によって新しい局面を迎え、乱流および伴う輸送に関わる非平衡性や非線形性をより定量的に扱う枠組みを得て、物理的な理解に基づいた乱流輸送の表式を作り上げうる時代へと歩を進めている。また、より広く物理学的には、極限的非平衡状態にある、平衡から遠く離れた物質の状態の研究として位置づけられ21世紀の物理学の最先端ともいえる研究領域を切り拓きうる。流体とは異なった点としてはじめに述べた個別粒子性の出現がある。最近の乱流研究では、流体的な記述の範囲では説明できない実験結果がみつ

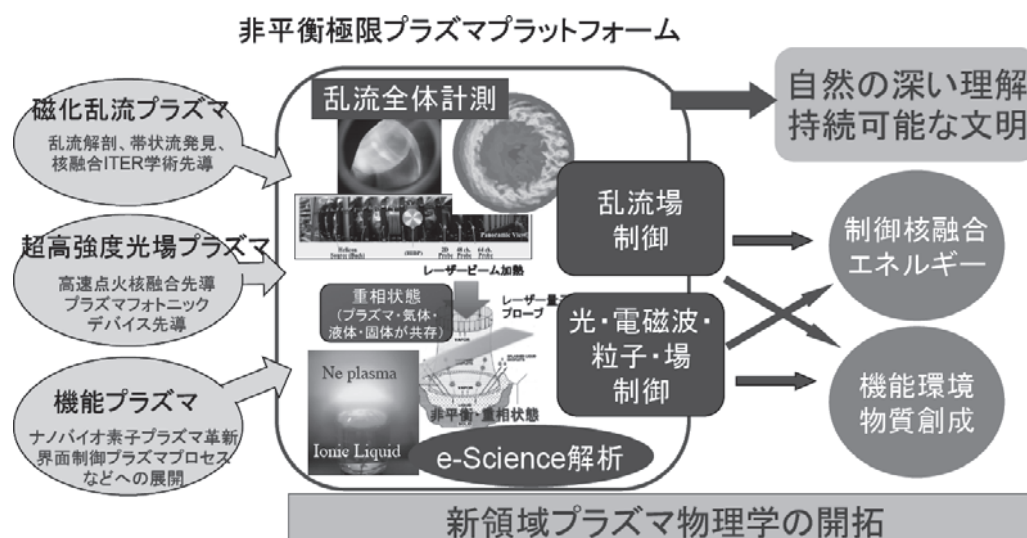


図1 非平衡極限プラズマ研究概念図。

かっており、プラズマ乱流研究においても、いよいよ個別粒子性-位相空間での取り扱いが余儀なくされる時代となってきた[6]。非線形相互作用を扱うための解析ツールの発展は著しい。ウェーブレットを利用した時間分解能のある周波数空間の解析等も使われており非平衡動的過程を定量的に扱うことも可能となり、非線形過程の制御や「乱流場の制御」も可能となるであろう。これらの研究は、惑星大気、磁場生成、太陽内部の輸送障壁、降着円盤周りの乱流輸送などにも知見を与える研究である。図2に乱流プラズマのアプローチの概念図を示す。

2.2 超高強度光場プラズマ

極限プラズマを生成する方法のひとつとしてレーザーが用いられる。現在ではベタワットを超えてエクサワットレーザーが開発される時代であり、SACLA（さくら、SPRING-8 Angstrom Compact Free Electron Laser）による自由電子レーザーも著しくパワーが増強され、光電場としては小さいがパワーとして通常のレーザーを凌駕しつつある。近年では強力なX線レーザーと物質の相互作用を利用することでアト秒パルスを制御することも可能となっている。この極限の高強度な光場を生成することで、真空と光が相互作用する非線形光学の領域、真空の破壊など物理的にも興味深い極限状態の実現が期待される。また、平衡過程では達し得ない1 TPaほどの超高圧の極限状態の実現によるスーパーダイヤモンドなど新物質の創成が可能であるし、やがては金属水素など夢の物質状態の実現もそのターゲットに入れている[7]。既に金属シリコン創成取り出しに成功する等の成果を上げ、世界の研究に大きな波及効果を示している。また、重相あるいは Warm Dense Matter と呼ばれる極限物質状態を創ることが可能である[8]。この状態は、大電流アーク等でも実現が可能であり、固体、液体、気体、プラズマが入り交じった、あるいは層状に形作られた状態である。この重相状態は、粗視化してひとつの物質の状態として観測した場合、特有の物性として捉えることができる。その状態方程式や物性は極限の物理学としても、惑星内部の物質の状態とも関連して興味深い研究

対象である。宇宙船が大気圏に再突入するときの機体表面や核融合炉壁の熱負荷下にある状態がまさに重相状態であり、その制御は重要な応用のひとつである。

レーザーにとって、プラズマは生成するだけの対象ではない。プラズマの積極的な利用法がある。通常の金属ミラーでは現在の強力なレーザーでは壊れてしまう。プラズマをミラーとして利用し、これによって集光性を高めることができる[9]。また、回折格子として利用することで高強度レーザー光の制御が可能であり、プラズマのフォトン制御の一例である。また、プラズマ中ではきわめて強い電場を得ることが可能である。強力な光をプラズマと相互作用させることで極限的に強い電場を得て、プラズマ中にある粒子を加速しコンパクトな加速器を作ろうとする試みが進められている。より安価でコンパクトな粒子加速器が可能となれば、医療応用にもきわめて優れたものができあがるだろう。プラズマを用いることで極限高強度「フォトンや電場の制御」が可能である。図3に超高強度光場プラズマのアプローチの概念図を示す。

2.3 機能性プラズマ

プラズマは様々な機能性を発現し現代文明の根底を支えてきた。中でも、非平衡（プロセス）プラズマの機能性は、リソグラフと同様にムーアの法則で知られるような数10兆円規模産業である半導体の爆発的發展を支えてきた原動力のひとつである。半導体の薄膜形成やエッチングにおいて、熱による化学過程を使った平衡反応はアレニウスの法則で規定される。しかしながら、プラズマを用いた非平衡過程の場合、電子温度を制御することによって常温や平衡での反応に比べきわめて高い効率を達成することができる。もはやこうしたプラズマの半導体プロセスへの利用は常識の範囲である。最近では、プラズマを利用しより効率のよい多重励起子型太陽電池を求めてナノ粒子生成法が開発されている。また、プラズマを用いて高速かつ省電力性を併せもつ酸化化物半導体材料 ZnInON の高品質結晶、単結晶化および任意の組成の混晶生成など、非平衡においてのみ可能なプロセスを実現している[10]。未来において

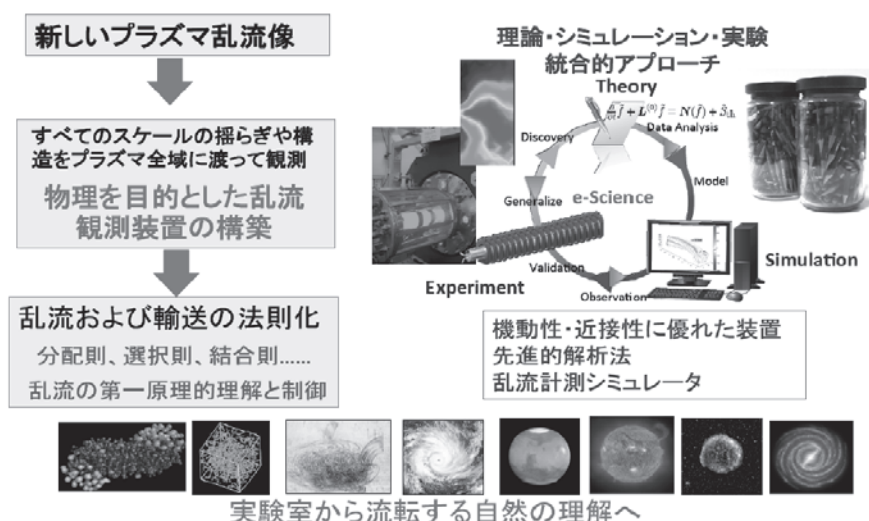


図2 磁化乱流プラズマのアプローチ。

は、フレキシブルデバイスやウェアブルデバイスの加工にはプラズマが欠かせないツールとなるであろう。今後の技術革新のためには、プラズマと固体のナノ界面での相互作用の理解および揺らぎの制御が不可欠である。

現在では、医療分野において滅菌、表面処理、治療などへのプラズマ応用も盛んに行われている[11]。半導体プロセス同様に、熱を使った医療器具の殺菌や滅菌は有毒ガスの使用を余儀なくされたり、高温のためプラスチック系の道具は使えないなどの欠点がある。しかしながら、これらの滅菌法に比べプラズマを利用した場合圧倒的にその効率は高く、短時間での高速滅菌が可能である。その他、環境浄化や白物家電への滅菌装置の取り付け、トイレなどの衛生機器の洗浄・殺菌等へも応用されようとしている。また、医療そのものとしても、既にアルゴンプラズマを利用した花粉症治療が行われているのに加え、低温大気圧プラズマを利用した止血、血管新生、細胞増殖など様々な治療効果が得られることが知られており今後の進展が期待されている。また、農業応用として種子にプラズマを照射することで、2.5倍ほど成長の速い個体を作り上げることに成功している。

一方、ナノ分野とバイオを融合し新機能性物質を創ろうという試みが鋭意進められている。“ナノ”と“バイオ”に関連する研究が当代の花形研究であることは疑いようがないが、それら各々では各種プラズマ研究が活発に使われている[12]。両者を融合した「ナノ・バイオプラズマ」研究は、世界を先導できる次世代科学技術創出に必須であり、さらに世界最先端の研究領域として有望視されている。それは、プラズマと気体・液体の界面を制御することでカーボンナノチューブの中にDNAを挿入したり金粒子を導入したりする試みであり、新領域が開拓されている。ここで

はプラズマとイオン液体の（気液）界面（あるいはそこに出来る電場）を制御することでナノ粒子生成やナノバイオ複合物質精製の制御法が開発されている。また界面での揺らぎパターンは液相に転写することが可能であり、ナノ粒子の結晶の間隔を制御することもできる。ここでは、プラズマ界面の揺らぎ、電場による「粒子の制御」が重要な課題である。半導体プロセス、医療応用、ナノ・バイオプラズマに関しては、固体、液体、生体などとプラズマ界面において物理プロセスの詳細、その機能を発揮させるため界面の理解と制御が重要な課題である。図4に機能性プラズマのアプローチの概念図を示す。

2.4 シナジーによる発展と新学理

現在、プラズマ研究は原子・分子から天体に亘るきわめて大きなスケールで、自然科学の諸領域、物理学、天文学、化学、生物学、農学、薬学、医学など多岐に渡る応用へと展開している。学術として21世紀に残された課題「非平衡」の物理学として、また、応用としてはスーパーダイヤモンド、金属水素などの新物質創成、ナノ・バイオテクノロジーなど学際的な新領域を開拓しつつある。これら一見直接は関係が薄いとみられる広汎な分野もプラズマを通してみると、その学理に、揺らぎ、界面、分岐など様々な共通のキーワードが存在しており、一歩進めてプラズマ以外の他分野への知識の還元も可能であろう。宇宙を考えてみれば、平衡状態にあるものはむしろ特別であり、自然のより深い理解のためには非平衡の研究が必要であることは説明を要しないであろう。

非平衡と端的にいってもその包含する領域はきわめて広い。その理解のためには、まず極限的な状態や機能性を実現しその学理を得ることが重要である。重相状態や高エネルギー密度状態の物理等はこの極限状態の研究を進めるも

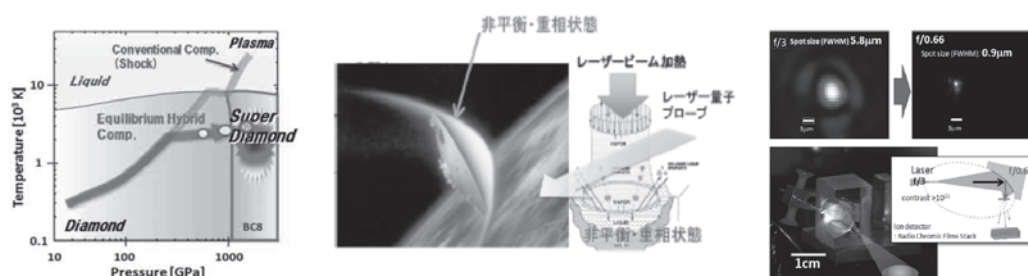


図3 超高強度光場プラズマのアプローチ (1)ダイヤモンドの相図。温度上昇を抑えた圧縮過程によりスーパーダイヤモンドを創成できる (2)再突入船の表面に見られる重相プラズマと研究のイメージ (3)プラズマフォトンクスによるレーザービームの集光制御。

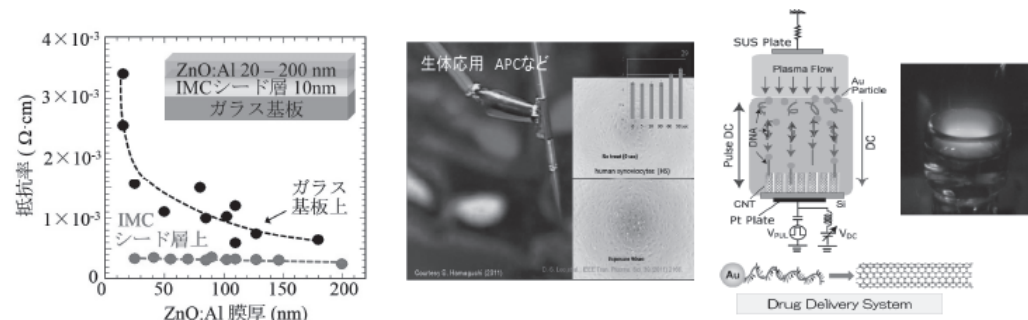


図4 機能性プラズマアプローチ。(1)ナノ界面プラズマによる低抵抗 ZnO 薄膜の実現。(2)医用プラズマ。アルゴンプラズマ凝固法概念図。(3)ナノバイオプラズマに用いる気相-液相界面プラズマ装置概略図。

のである。一方で、現代技術は一個の原子を制御することができるまでに至っている。プラズマというまでもなく荷電粒子の多体系であり、その理解によって多数の原子・分子、フォトン、さらには場を制御でき、その産業応用に対する寄与は多大なものがある。また、プラズマが存在する領域では、実現できる電場の上限をより高く設定することができ、安価な粒子加速器ほか、様々な応用も考えられている。プラズマを利用することでより進んだフォトン、電場、粒子制御が可能である。また、レーザーはプラズマの計測にも欠かせないツールであり、磁場閉じ込め乱流プラズマ、機能性プラズマそれぞれの分野において使われている。光プラズマ領域で発展させてきた技術はこの方面に還元することが期待できる。

また、プラズマ物理学の発展を支えてきた核融合研究においては、プラズマ物理学諸分野の連携により統合的な研究が可能である。炉心プラズマの制御には乱流プラズマの理解が不可欠であり、高熱流を支えるダイバータ壁などの炉壁を制御するためには重相状態プラズマの研究が必要である。炉壁とプラズマの境界には機能性プラズマで研究対象とされるダストなどの挙動の理解やその機能性の利用による炉心プラズマ制御などの課題もみえてくる。以上、それぞれ独自に発展してきた各領域の学理、技術を互いに有機的に結合することで分野全体の著しい発展が期待される。

3. プラズマ研究とコミュニティの広がり

3.1 プラズマ研究コミュニティ

プラズマの応用はきわめて広くかつ網羅する分野も多い。陰に日向に現代文明の根幹を支えている。これまでプラズマ研究は核融合研究を中心として発展してきた。エネルギーの必要性から莫大な研究資金が世界中で投入されてきた。その核融合研究は現在、国際協力による燃焼プラズマ実現に向けて動いており、核融合の基礎科学研究から工学的実証へと突入し新しい時代を迎えている。今後は、この広い応用を持つプラズマ諸分野を戦略的に統合し、そのシナジーを用いて新しいプラズマ科学を発展させていく時代であろう。実際、プラズマ・核融合学会はもちろんのこと、日本物理学会、天文学会、地球電磁気・地球惑星圏学会、応用物理学会、電気学会、日本原子力学会、静電気学会など多くの学会に関わる学際的な領域である。先回金沢で開かれたプラズマコンファレンス2011（プラズマ・核融合学会・日本物理学会・応用物理学会プラズマエレクトロニクス分科会による共同主催）には1072人が参加しているし、ごく最近千葉幕張メッセで開催された第12回 Asia Pacific Physics Conference (APPC) のプラズマの分科会だけでも1000人を超える参加者が数えられている。プラズマ物理学を発展させる意味では、すでに学際的に大きなコミュニティを作り上げている。国際的な共同研究も盛んである。乱流プラズマの分野では、「磁場核融合に関する国際連携研究所」(LIA336) が九州大学、核融合科学研究所、大阪大学、CNRS、プロバンス大学の間で行われている。超高強度光場プラズマの分野では ICHEDS (International Col-

laboration for High Energy Density Science) など国際的な拠点を形成している。また、合衆国、欧州との core-to-core 協力の他、中国、韓国、インドなどととも日本を中心とし「高強度フォトンを使う高エネルギー密度状態の科学」の題目の下に国際協力関係ができています。本ネットワーク計画はこのプラズマ物理学を牽引する原動力である。さらに広い展開も進んでおり[13]、プラズマ研究コミュニティによってプラズマ物理学の未来が拡張されている。

3.2 ネットワークの現状

本ネットワーク計画「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」は、年来の共同研究、物理学会やプラズマ・核融合学会での連携シンポジウム等の企画を通じて形作られた。2009年12月21日の日本学術会議エネルギーと科学技術分科会での討議を踏まえ、2010年1月12日のプラズマ物理学・核融合科学の振興をめざした「物性物理学・一般物理学分野の大型計画に関するシンポジウム」検討ワークショップにて公表され支持を受けた[14]。「物性物理学・一般物理学分野の大型計画に関するシンポジウム」(2010年1月27日)では核融合プラズマとレーザープラズマの講演が行われた。日本学術会議の物理学委員会では2011年1月31日[15]、および2013年1月15日の公開シンポジウムでその意義が説明され物理学としての意義が認められている。本ネットワーク計画はマスタープラン2010、2011に採用され[16]、文部科学省のロードマップでは優先度を認められた18計画(2011) 17計画(2012)に採用された[17]。現在のところ、ネットワーク計画の拠点は、九州大学(伊藤極限プラズマ研究連携センター、プラズマナノ界面工学センター)を中心として北から東北大学、電気通信大学(レーザー新世代研究センター)、名古屋大学、核融合科学研究所、金沢大学(サステナブルエネルギー研究センター)、大阪大学(光科学センター、アトミックデザイン研究センター)を主な拠点として発足している。

本ネットワーク活動に沿って、上述のプラズマコンファレンス2011では「様々なプラズマの非平衡性」と題するシンポジウムが催され、2013年春の日本物理学会年会では、「非平衡極限プラズマダイナミクス-その多様性と普遍性-」と題するシンポジウム(2013年3月)が開催されている。そのほか、コアメンバーを中心とした小規模なワークショップが多く開催されている。たとえば、非平衡極限プラズマ全国共同連携研究ネットワーク(2011年1月19日)、H-モード発見25周年記念国際シンポジウム(2012年1月24日)などが開催されている。この活動は顕在化し、日本物理学会領域2においても企画講演セッション「非平衡極限プラズマ」が2013年秋の分科会より設定されており、プラズマ・核融合学会では「非平衡極限プラズマ」の分科細目が2013年の年会(12月)より発足している。また、平成25年度から科研費の「系・分野・分科・細目」が改訂され、応用物理学分科に新しく「プラズマエレクトロニクス」が設置されており、総合理工学としての評価の高さを示している。この横断的なコミュニティを作り上げる試みは世界でも初めてのことであり、今後世界的な潮流の源泉となる可能性を有している。

4. おわりに

本ネットワーク研究は、遠非平衡系の科学、新しい学問として先端研究であるだけでなく、量子ビーム科学、加速器科学、超高強度光場物理学、高密度物質科学などの最先端科学をさらに拡張するとともに、惑星科学、地震学、経済社会学等、複雑系科学としての波及効果も併せもっている。

さらに、プラズマは現在文明を支える基幹技術を提供しており、プラズマを使わずに先端科学技術はあり得ない。新エネルギーの生産（核融合、太陽電池等デバイスの実現）やエネルギー変換の合理化（非平衡プロセス）などエネルギー科学に加え、プラズマ医療、非平衡プロセス工業、宇宙天気予報、機能性新材料、等の基盤学理として重要である。また、素材を制するものは産業を制するともいわれるが、機能性物質を創成するために必要な極限非平衡プラズマの物理科学に起源をもつ研究が育っている。スーパーダイヤモンド創成をはじめとする極限非平衡プロセスの活用研究も、プラズマ物理科学を新規産業や脱 CO₂ 社会や持続可能な文明実現に活かすことができる。

大きな知的価値・社会的価値を伴うプラズマの学理の探究はきわめて緊急性が高い課題である。

最後に、日本はプラズマ諸分野の研究において国際的に先導し、その発展に重要な貢献をなしてきた。プラズマ自身その生成法の違いや研究目的の違いから異なる発展の仕方をしてきたが、学理は共通である。非平衡大規模ネットワーク研究としてプラズマはきわめて適切なテーマで、かつ世界に先駆けた試みである。人類は「火」を扱うことで現在の文明を切り拓いた。プラズマ諸分野を結びつけてその学理を確立しその応用を開拓することで、プラズマは「21世紀の火」として将来の文明社会を切り拓く原動力となる。

謝 辞

本研究の推進と基盤の構築のために、科学研究費補助金基盤研究（23244113, 22244072, 22244012, 21654084, 21224014, 19054001, 18204055, 18104011, 13852016）、戦略的創造研究 CREST「高エネルギー密度プラズマフォトリクス」、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] 伊藤早苗他：プラズマ・核融合学会誌 87, 371 (2011).
- [2] P.H. Diamond *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 47, R 35 (2005).
- [3] A. Fujisawa, Nucl. Fusion 49, 013001 (2009).
- [4] S. Inagaki *et al.*, Phys. Rev. Lett. 107, 115001 (2011).
- [5] S-I. Itoh and K. Itoh, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 124501 (2010).
- [6] S-I. Itoh and K. Itoh, Scientific Rep. 2: 860 15 Nov 2012.
- [7] 尾崎典雅他：プラズマ・核融合学会誌 85, 636 (2010).
- [8] 米田仁紀：プラズマ・核融合学会誌 81, Suppl. 172 (2005).
- [9] 兒玉了祐：バリティ 26, 10 (2011).
- [10] 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/>
- [11] 浜口智志：プラズマ・核融合学会誌 87, 696 (2011).
- [12] 金子俊郎, 畠山力三：プラズマ・核融合学会誌 87, 704 (2011).
- [13] 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/>
- [14] 伊藤公孝 他：プラズマ・核融合学会誌 86, 188 (2010).
- [15] 伊藤早苗：プラズマ・核融合学会誌 87, 247 (2011).
- [16] 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」
<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>
- [17] 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