

平成27年度「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」  
実施報告書

平成 29 年 1 月 26 日

機 構 長 宛

プロジェクト実施責任者(所属・職名・氏名)  
核融合科学研究所・准教授・秋山 毅志

## 1. プロジェクト名

高精度波面計測によるプラズマ揺動計測と分子生物学的揺らぎ研究への展開

## 2. 実施体制(協力者、協力機関)

## ①協力者(所属・職名・氏名)

国立天文台・准教授・早野裕

国立天文台・特任准教授・大屋真

基礎生物学研究所・研究員・服部 雅之

基礎生物学研究所・助教・玉田 洋介

基礎生物学研究所・特任准教授・亀井 保博

基礎生物学研究所・准教授・野中 茂紀

基礎生物学研究所・准教授・村田 隆

University of California-Santa Cruz・Professor・Joel Kubby

九州大学・教授・稲垣滋

## ②協力機関

核融合科学研究所

国立天文台

基礎生物学研究所

University of California-Santa Cruz

九州大学

3. 予算額 10,000 千円

4. 執行額(見込額を含む。) 10,000 千円

別紙「平成27年度「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」執行額」のとおり

## 5. 実施計画時の目的・目標

本研究では、これまで自然科学研究機構において天体観測・生細胞観察のために開発・応用が進められてきた波面計測を、新たにプラズマの乱流計測手法として確立することを目的とする。そして、それに伴った波面センサーの改良を通し、プラズマ計測だけでなく生細胞観察等においても、観測対象の動的現象の研究へと可能性を広げることを目指す。

光が媒質を透過する際、屈折率が不均一であると波面に乱れが生じる。その光で観測を行う場合、波面の乱れによって像のボケや歪みが生じる。望遠鏡や顕微鏡では、波面乱れが解像度の上限を決める要因の一つになっている。望遠鏡の場合は大気の揺らぎによって波面が乱れることから、すばる望遠鏡では光の乱れを補正し解像度を向上させるために「補償光学」を導入し、回折限界に迫る解像度を達成している。補償光学系は、波面センサー、可変形鏡、制御用コンピューターから構成されている。波面センサーで観測光の波面の乱れを測定し、それをコンピューターで解析して波面補正する可変形鏡の鏡面形状を制御

する。その結果、波面の乱れが補正され、解像度を改善することができる。

この補償光学系の技術は顕微鏡に応用され、成果を挙げつつある。顕微鏡においては、観測光が細胞内の屈折率の異なる様々な構造体を通るため、波面が擾乱を受ける。この問題に対し、「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」にて補償光学系を顕微鏡に応用し、生きた細胞内構造による波面の乱れを補正して、回折限界に迫る細胞内観察を世界に先駆けて達成した。それと並行して、分野間連携研究プロジェクトでは、今後の更なる高感度・高分解能の波面計測のため、新型波面センサーの開発も進めてきた。

磁場閉じ込め核融合プラズマでは、乱流揺動がプラズマの閉じ込めを支配していると考えられている。プラズマを高温・高密度化し、核融合炉を実現するためには、高温・高密度化を妨げる乱流揺動の駆動機構を理解し、抑制方法を確立する必要がある。これまで様々な乱流揺動計測手法が提案され、多くの成果が挙げられてきた。一方で、プラズマの高温化、装置の大型化が進むにつれ、有効な乱流揺動の計測手法が限定されるという問題が浮上してきた。例えば、金属製の探針を用いる静電プローブ法は、直接乱流揺動を測定できる成熟した手法であるが、計測範囲は探針が溶けない低温領域に限定される。また、乱流揺動による屈折率の回折格子状構造により、レーザー光が散乱されることを利用したレーザー散乱法は、散乱光の受光ポートの取り合いの難しさや、ブラッグ散乱を満たす成分のみが計測される等、限定的な使用になる。現在国際協力で建設が進められている、国際熱核融合実験炉 ITER においては、乱流揺動計測法が少ないことが指摘されている。

本申請では、新しい乱流揺動計測手法として、レーザー光の波面乱れからプラズマ中の乱流揺動を捉える手法を提案し、実際のプラズマに適用して実証することを目的とする。望遠鏡で観測光の波面が大気の揺らぎで乱されるのと同様に、プラズマにレーザー光を入射すると乱流で波面が乱れる。透過光の波面乱れを波面センサーで測定し、乱流の情報を引き出そうという試みである。一般的に、プラズマ中の乱流は微小でプラズマのサイズも限られるため、望遠鏡の場合と比較して波面の乱れは小さい。そのため、波面センサーの信号処理手法の開発を行い、微小な波面乱れから乱流揺動の情報を引き出す手法を確立する。また、ハードウェア面からの改善として、これまでの分野間連携で行ってきた波面センサーの高感度・高分解能化を継続する。

本手法は変調等の複雑な光学系を必要とせず、プラズマ透過光を波面センサーに入射するだけの非常に簡単な光学系となる。また、散乱計測のように揺動の特定の波数成分が選択的に計測されるわけでないため、広いパラメータ領域の揺動成分が計測でき、データの解釈がし易い利点がある。一方、これまでの補償光学で取り扱われてきた大気揺らぎ(～kHz)と比較してプラズマの乱流揺動は速い現象(数 kHz～MHz)であり、その点が世界で進められつつある補償光学研究から見ても新しい点である。それに加えて、プラズマの揺動計測を通して微小・高速の波面乱れの計測手法が進展すれば、生細胞組織観察においても、波面の乱れは小さいが、その変化速度は速い現象、例えば温度変化などによる分子揺動の変化を直接計測する手法に発展すると考えられ、新しい進展が期待できる。

## 6. 実績の概要(A4:1枚程度)

平成 27 年度では、九州大学応用力学研究所にある直線型プラズマ装置 PANTA にて、市販のシャック・ハルトマン波面センサーを使用してプラズマ揺動の計測を試みたが、有意なハルトマンスポットの変化は観測できなかった。これは密度揺動がごく微小である上、波面センサーを構成するシリコン受光素子の感度特性から使用できる近赤外光では、プラズマによる位相変化が小さいことが原因であると考えられた。波面センサーは、上記の天体望遠鏡やライブイメージング顕微鏡のほか、近年は工場での生産ラインで干渉計の代わりに波面センサーを使う試みがなされるなど、波面センサーの利用が広がりつつある。波面センサーには撮像素子の画素数、マイクロレンズアレイのアレイ数・焦点距離などのフリーパラメータがあり、観測対象物によってそれらが最適化される必要がある。現在のところ、波面の微小変化計測を目的として生産された波面センサーはなく、使用した市販の波面センサーではハルトマンスポットの解像度が不十分であっ

たと判断した。

そこで、本年度はまずプラズマ乱流揺動の検出に適した波面センサーを自作し、そして、昨年度に引き続き、PANTA にて乱流揺動による波面変化が自作波面センサーで計測可能か検証を行った。光源波長は、昨年度と同様にシリコン受光素子の感度帯域で最も長波長で位相変化が大きくなる Nd:YAG レーザー (波長 1.064  $\mu\text{m}$ ) を用いた。プラズマによる位相変化を増やすため、プラズマ中をレーザー光が 5 回透過するように反射ミラー系を配置した。この場合、空間分解能は失われるが、今年度の実験は波面変化を測定することを主眼として実施した。微小なハルトマンスポット幅から波面変動を捉える場合、機械振動でスポット位置が変動するとプラズマによるスポット位置変化に対してノイズになり、データ解析が難しくなる。また、昨年度の光学台は小さく、光学系を改良する際に支障が生じていたため、平成 28 年度は光学架台を製作し直し、梁による補強や振動減衰シートの使用などを併用し、光学架台の対策を講じた。

PANTA では kHz 以上の周波数の揺動が静電プローブ等で観測されている。揺動によって波面がひずみ、それが時間的に変動すると、重心位置を中心にハルトマンスポットの位置が微小に変動する。観測の時定数に対して露光時間を十分長くすると、撮像素子は時間変動するスポット分布を積算するために、スポット幅が広がることが予測される。そこで、プラズマあり、プラズマ無しの状態でハルトマンスポットの計測を行い、それぞれを比較してスポットがどのように変化するかを調べた。波面変動は微小であるので、複数枚のハルトマンスポット画像を重ね合わせ、計測誤差を除去することとした。昨年度の計測では、波面センサーのトリガー系が十分に整備できず、プラズマあり、無しのデータ数を十分に取ることが出来なかったため、今年度は PANTA のプラズマ生成時のトリガーを取り込めるようにし、統計データ数を増やした。データ取得時には、一つのプラズマ条件につき、100 フレームのデータを取得して解析を行った。

以上の実験環境の整備を行った後、PANTA 装置でのプラズマ計測を行った。プラズマがある場合、ない場合でハルトマンスポットを 100 フレームずつ撮像し、それぞれで積算平均した後にその差分を取った像がハルトマンスポットの広がりとなる。ハルトマンスポット幅の広がりは、乱流揺動のほかにも機械振動、空気の揺らぎ、真空容器内のガスの流れによっても生じる。そこで、それらは比較的周波数が低いと考えられるため、露光時間を短く 1 ms にしてその影響を可能な限り現れにくくして撮像を行った。上記の計測誤差となる要因が、ハルトマンスポットをどの程度広げるかを評価するため、プラズマがない場合のデータを時間的に前後二つに分け、それぞれの積算平均の差分を取ったものを「確かさの下限」として定義した。プラズマありの場合のハルトマンスポットの広がりは、確かさの下限よりも有意な広がりを持っていることが確認され、プラズマ中の乱流揺動による微小波面変化を測定出来ていると考えられる。スポット幅の広がりがプラズマ揺動によるものであることを確認するため、PANTA のガス圧を増大させ、揺動が大きくなる条件での計測を行った。その条件ではスポット幅がより広がることを確認でき、揺動による波面広がりが測定できていることを支持する結果が得られた。

今後、計測分解能を高めるためには、振動の更なる抑制、光学系を完全に囲って空気の流れを極力少なくすることなどの光学架台の改造が挙げられる。今年度はレーザー光がプラズマを 5 回透過する配置でデータを取得したが、揺動による位相変化を増やすためにプラズマを挟んだ共振器を構成し、透過回数を増やす試みも準備を進めている。また、望遠鏡によって光量もサイズも小さな太陽系外惑星を観察する際に、明るい恒星からの光を消去するため、フォトニック結晶光渦マスクによるゼロ次成分の除去が提案されている。波面センサーを用いたプラズマ乱流揺動計測にも、同様の光渦マスクを用いることで、ゼロ次成分を除去し、高次の波面乱れ成分だけを測定することで、撮像素子のビット数を有効に利用できることと期待される。そこで、現在の実験条件にあったフォトニック結晶光渦マスクを設計し、発注を行った。今後、プラズマ実験に適用し、計測精度改善の有無を検証する予定である。また、顕微鏡を用いた分子揺動計測については、昨年度牛乳を用いて分子揺動の計測に成功していたが、今年度高速かつ微弱のプラズマ乱流揺動の計測に成功したため、この手法を生細胞観察に適用し、生細胞内の分子揺動観察に着手する。

プラズマと生体分子の揺動について、議論と洞察により共通目標を明確に掲げて取り組み、分野間連携の相乗効果からブレークスルーが得られた。今後の発展につなげていきたい。

## 7. 実績(詳細)(書式自由、枚数の制限なし、別添資料可)

本課題は、これまで基礎生物学研究所と国立天文台の若手分野間連携研究プロジェクトで開発を進めてきた補償光学を更に拡張し、核融合プラズマ中の乱流揺動や細胞内の分子ダイナミクスの観測に応用しようというものである。本課題名では昨年度からの2か年の申請であり、昨年度はシャック・ハルトマン波面センサーを用いたプラズマ計測を本格的に開始したと共に、分子ダイナミクス観測の原理検証と実験環境の整備を行った。昨年度は、市販のシャック・ハルトマン波面センサーをプラズマ計測に使用したが、揺動による有意なハルトマンスポットの変化を測定することが出来なかった。そのため、本年度は揺動によるハルトマンスポットの変化をまず捉えることを第一目標とし、プラズマ計測方法の確立を主眼とした。

図1にシャック・ハルトマン波面センサーの原理を示す。シャック・ハルトマン波面センサーは、マイクロレンズアレイとCMOSなどの撮像素子から構成されている。波面の乱れが無い平面波が入射した場合、撮像面に形成される「ハルトマンスポット」と呼ばれる集光スポットは、マイクロレンズの配置の通りに格子状に等間隔に並ぶ。一方、波面に乱れが生じた場合は、各マイクロレンズに対して光線が斜入射することになるため、ハルトマンスポットの間隔は不規則となる。一般的にシャック・ハルトマン波面センサーは、このハルトマンスポットの位置の変化から波面形状を再構成する。これに対し、プラズマ計測の場合は電子密度の乱流揺動による波面の変化は微小であり、ハルトマンスポットの重心位置である $\mu_1^x(m, n)$ の変位量は極めて小さい。また、揺動の周波数はkHz～MHzとCMOSなどの露光時間より速いことから、重心位置を中心にスポットが微小変動し、それが露光時間内で積算されることによって撮像されるハルトマンスポット幅が広がると予測される。

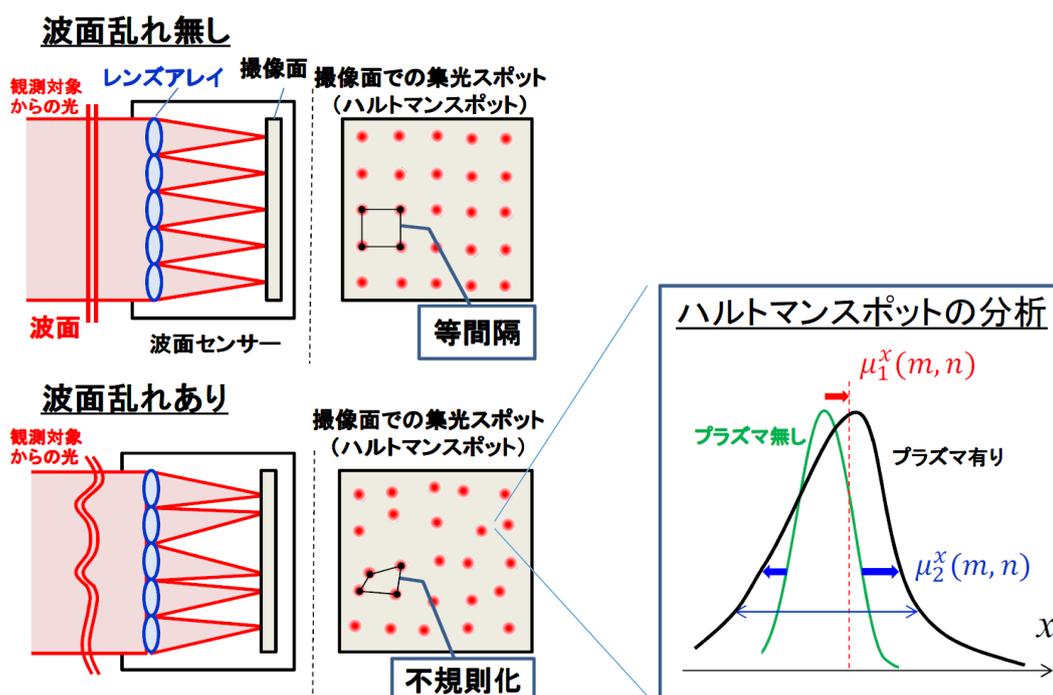


図1 シャック・ハルトマン波面センサーの原理とプラズマによるハルトマンスポットの変化

本年度のプラズマ揺動計測は、

- ① 自作シャック・ハルトマン波面センサーの設計と製作
- ② PANTA での光学架台の改良
- ③ 原理検証実験の実施

を行った。

①について、昨年度はソーラボ社製のシャック・ハルトマン波面センサーを用いて波面の変化を捉えよう

としたが、有意な変化は観測できなかつた。通常の波面計測では、数波長分に相当する波面の変化を測定するため、大きく変化する重心位置が観測できれば十分と考えられる。一方、波面変化が微小なプラズマ計測では、重心位置よりもハルトマンスポット幅の評価が重要であり、スポットの強度分布計測を行うことになる。表 1 に昨年度使用したソーラボ社製波面センサー WFS20-5C の仕様を示す。一つのスポット当りのカメラピクセル数は 30、強度は 8 ビットでの計測となっている。図 2 に示すように、これをピクセル数の多いカメラを用いること、レンズアレイの数を減らし、1 個のハルトマンスポットに割り当てられるピクセル数を増やすことで、空間分布をより詳細に計測できる。また、スムーズな強度分布を得るためにはカメラのビット数を増やすことが有効である。そのため、ハルトマンスポットの詳細な強度分布計測のため、表 1 に示す浜松ホトニクス社製 CMOS カメラ ORCA-Flash4.0 V2 と、AMS 社製マイクロレンズアレイ APO-Q-P1300-R50 を用いてシャック・ハルトマン波面センサーを自作することにした。これにより、空間分解能では約 6.7 倍、強度分解能では 256 倍の改善となった。なお、レンズアレイの選定については、埼玉大学の稲田優貴助教の協力を頂いた。

表 1:平成 27 年度に使用したソーラボ社製波面センサーと平成 28 年度に自作した波面センサー

Specification	WFS20-5C (Thorlab)	CMOS カメラ: ORCA-Flash4.0 V2 (浜松ホトニクス) マイクロレンズア レイ: APO-Q-P1300-R50 (AMS)
Image digitization	8 bit	16 bit
Pixel	1440 × 1080 (7.20 × 5.40 mm)	2048 × 2048 (13.3 × 13.3 mm)
Lens let	47 × 35	10 × 10
Number of pixel per 1 spot	30	200

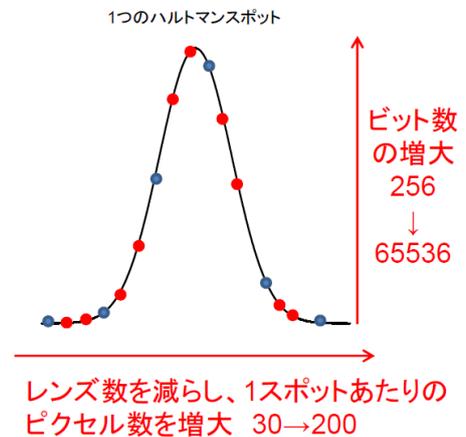
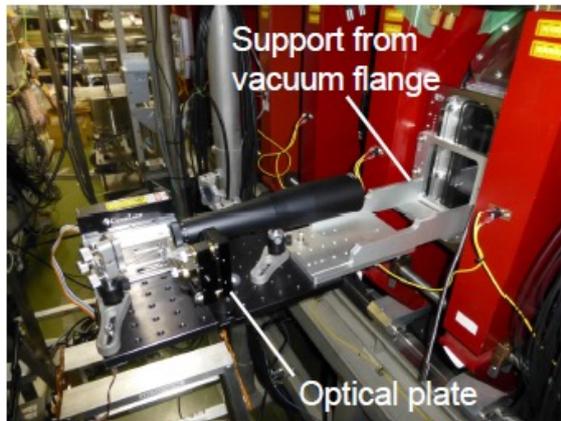


図 2:ハルトマンスポット計測の高分解能化

②については、昨年度は光学プレートを PANTA の真空窓フランジから支持を取っていたため、大きさ、重量の制約があった。そのため、今年度は PANTA の架台に直接支持構造物を固定して、大きな光学プレートを設置できるようにした。望遠鏡などの天文装置を参考にし、実験架台の基本構成は PANTA 架台の支持点からのトラス構造によって、光学プレートを固定した。さらに、光軸への影響が大きい回転モーメントなど高次の振動対策として、原因となるたわみが予想される箇所に梁や補強追加し、さらに、共振成分の抑制のため、支持構造と光学プレート間に振動減衰シートを挟みこんだ。振動を抑制する上では、光学架台を PANTA から分離し、床面に固定するのが理想的である。しかし、実験室床面へのアンカー打ちなどの作業が必要になるため、今年度は見送ることにした。

(a) 平成 27 年度の入射光学系



(b) 平成 28 年度の受光光学系



図 3(a) 平成 27 年度における入射光学系。光学プレートを真空フランジから支持している。(b) 平成 28 年度に設置した新しい入射光学系架台。PANTA の架台に支持構造を固定し、広い光学プレート(60×90 cm)を設置して、光学系設計の自由度を上げている。

③については、図 4 に示すように各研究所から研究協力者らが九州大学応用力学研究所に集まり、PANTA にて原理検証実験を行った。光学系のうち、今回自作したシャック・ハルトマン波面センサーを図 5(a)に示す。焦点距離を微調整するためのレンズチューブにマイクロレンズアレイを取り付け、CMOS カメラ前面に配置している。図には示していないが、プラズマからの発光がバックグラウンドを時間的に変化させる問題を回避するため、レーザー光波長のみを透過するバンドパスフィルタをレンズチューブ内に取り付け、レーザー光のみを計測できるようにした。光源は昨年度と同じ波長 1.064  $\mu\text{m}$  の Nd:YAG レーザーを用い、計測したい露光時間に応じてアッテネータを調整して、CMOS カメラのダイナミックレンジ全体を利用して撮像した。PANTA での電子密度不安定性のスケールが 1 cm 前後であることから、ビーム径の中に密度揺同の構造が現れるようにレーザー光のサイズを 2 cm 程度とした。そのため、ピンホールとレンズを組み合わせたビームエキスパンダを用いてレーザー光径を拡大し、更に可変アパーチャで微調整をしている。揺動の信号強度を増やすため、レーザー光をいったん垂直方向に持ち上げた後、水平方向にレーザー光をずらしながらプラズマ中を 5 回透過させている。マイクロレンズアレイと CMOS カメラの有効径はほぼ同一の 1.3×1.3 cm であり、1/2 の縮小レンズ系を用いて幅約 1 cm 平行光にビーム径を縮小し、レンズアレイに入力している。計測時には光学系の周りに配置した支柱に遮光布を掛け、光路上の空気の流れを抑制するようにしている。

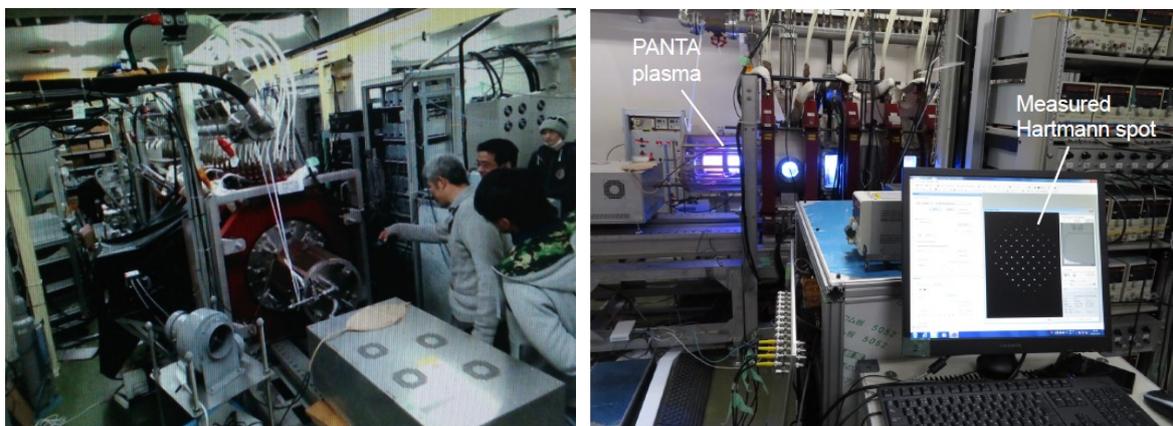


図 4 平成 28 年度の PANTA でのプラズマ実験。左から稲垣滋教授(九州大学)、秋山毅志准教授(核融合研)、牟田口嵩史技官(九州大学)、玉田洋介助教(基生研)。写真の外に、早野裕准教授(天文台)、服部雅之研究員(基生研)も参加している。

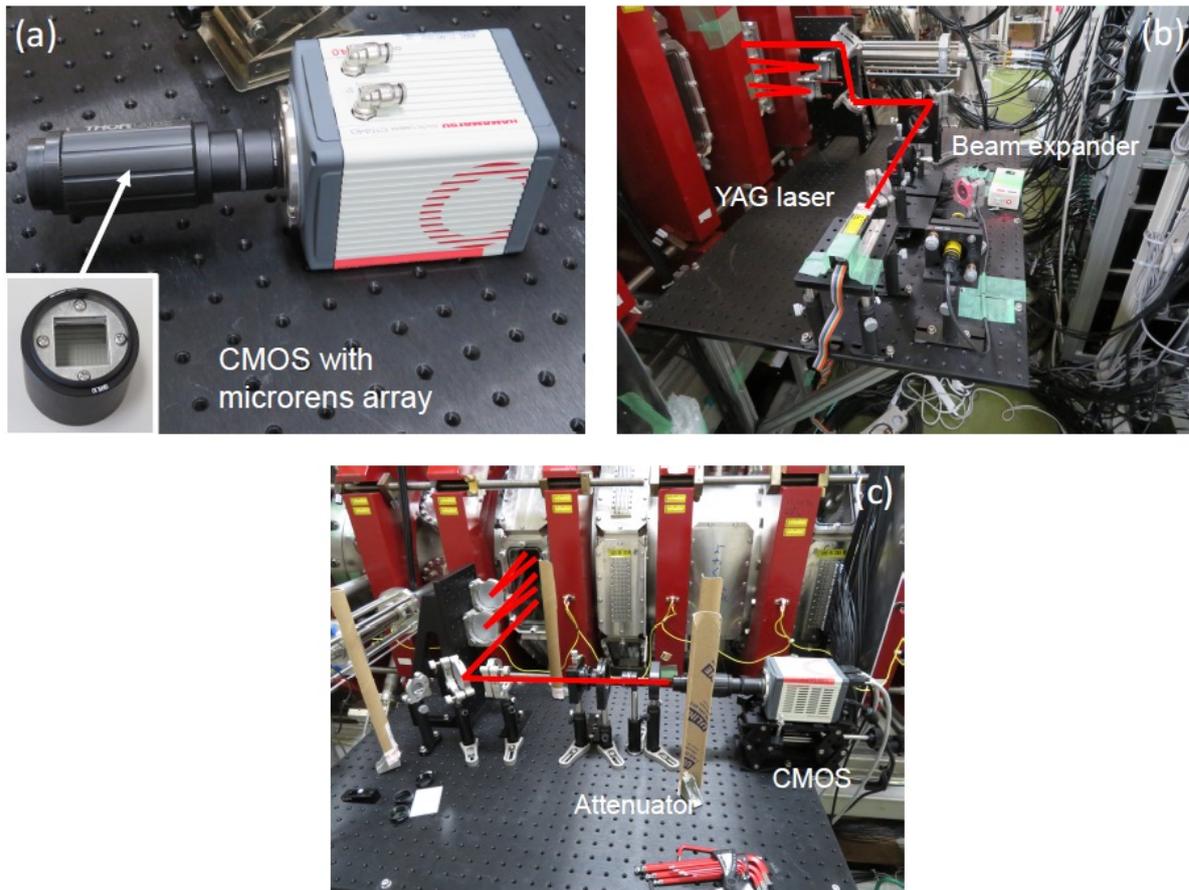


図5 (a) マイクロレンズアレイを取り付けた CMOS カメラ。(b) PANTA 装置に設置した Nd:YAG レーザー伝送光学系。レーザー光はプラズマ中を 5 回透過している。(c) 受光光学系。CMOS カメラへの入射パワーを調整するためのアッテネータ、及び CMOS カメラとマイクロレンズアレイの前面に  $1.064 \mu\text{m}$  のみを透過する狭帯域バンドパスフィルタを取り付けている。実験時には空気揺らぎと迷光の軽減を目的としてレーザー伝送光学系と受光光学系の両方に暗幕をかけた。

PANTA はヘリコン波でプラズマを生成し、500 ms プラズマ ON、1500 ms プラズマ OFF を繰り返している。ハルトマンスポットは、プラズマが ON して 200 ms 後に、露光時間 1 ms もしくは 200 ms で撮像した。リファレンスとして、プラズマ OFF 時のハルトマンスポットを取得しており、プラズマが消えてから 500 ms に同じ露光時間で撮像している。なお、プラズマからの発光によるバックグラウンド変化は、レーザー光波長のバンドパスフィルタを用いているため十分に抑制しているが、より確実性を高めるために、レーザー光を入射しない状態でプラズマ ON 時、プラズマ OFF 時のデータを取得し、レーザー光入射時のデータから差し引いている。

図 6 に本光学系で計測したハルトマンスポットの広がりを示す。PANTA の実験条件は、磁場強度 900 G、ガス圧 2.7 mTorr、ヘリコン波加熱パワー 3 kW である。この条件では、図 6(c) に示す周波数は 20 kHz 以下、空間スケールとして 2 cm 以下 ( $= \text{プラズマ周方向距離} \div \text{モード数} = 2\pi \times 5(\text{cm}) \div 15 = 2 \text{ cm}$ ) の密度揺動が発生している。この揺動によって、センサー上のレーザーのスポットには変位や形状の変化が現れるはずである。そこで、プラズマのある場合と無い場合で、それぞれスポットを積算して比較した。図 6(a) はプラズマありの積算平均スポット像から、プラズマ無しの積算平均スポット像の差分をとった場合であり、着色部が揺動によるスポット広がり分を示している。図 6(b) は撮像時間が異なる二つのプラズマ無い場合の積算平均スポット像同士で取った差分であり、確かさの下限値を表すものである。プラズマが無い場合のスポット広がりと比較し、プラズマありの場合は有意なスポットの広がりが見られる。光軸やレーザー強度の変動、空気の揺らぎなどによる計測誤差は十分小さいわけではなく、今後低減させて検証を続ける必要があるが、プラズマ揺動による変化が観測されていると考えられる。

PANTA では加熱パワーと揺動振幅に相関があり、加熱パワーが増大した際は揺動振幅が大きくなる。図 7(a)、

(b)は、それぞれ加熱パワーが3 kW、4 kW の場合であり、加熱パワーが大きい時に、スポット広がりが強くなっていることが分かる。このように、得られたハルトマンスポットの広がり傾向は、密度揺動の加熱パワー依存性とも合致する結果になっている。

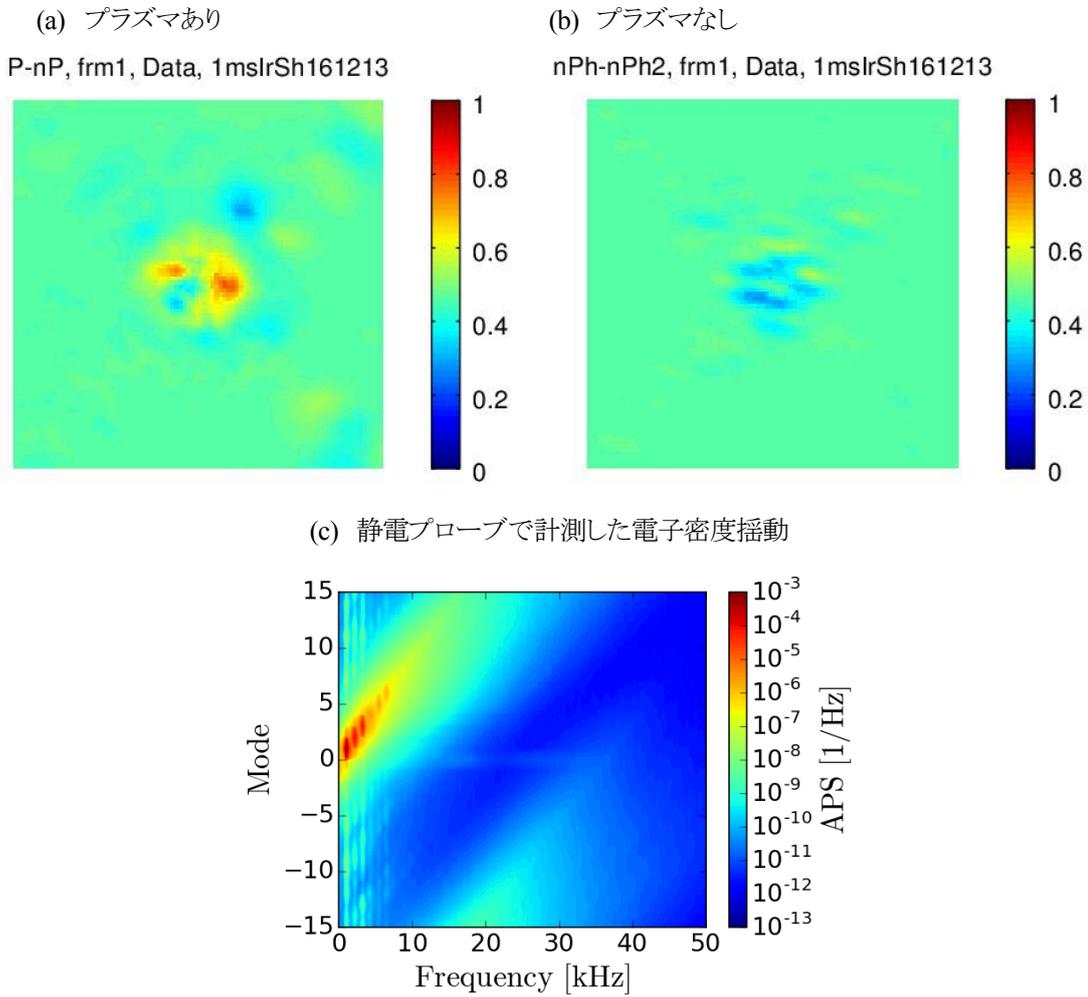


図 6(a)プラズマありの積算平均スポット像から、プラズマ無しの積算平均スポット像の差分をとった場合  
(b)撮像時間が異なる二つのプラズマ無しの積算スポット像で差分を取った場合で、確かさの下限値を示す。(c)周方向静電プローブアレイで計測した電子密度揺動。

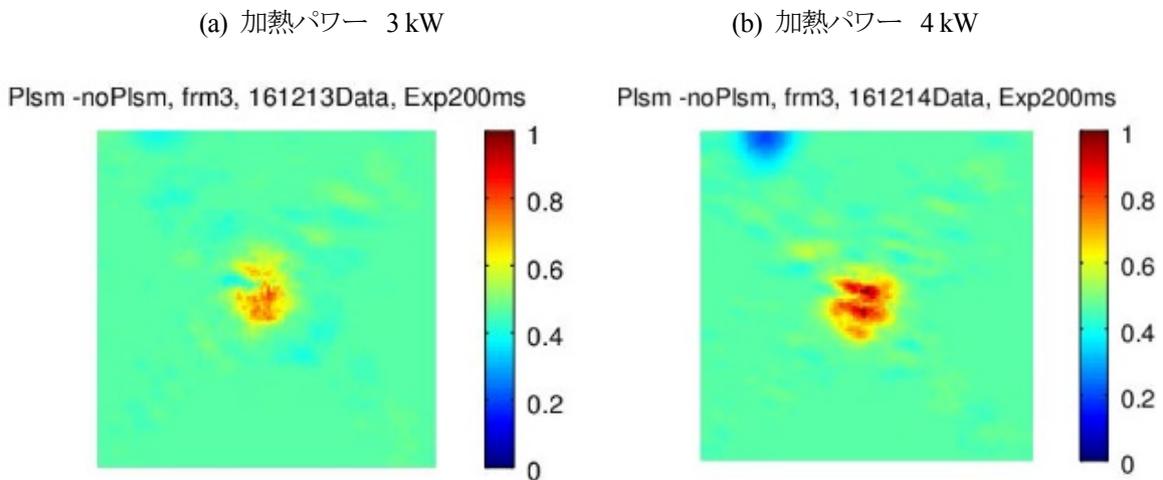


図 7(a)加熱パワー3 kW、(b)加熱パワー4 kW の時のハルトマンスポット広がり。

上述のハルトマンスポットの加算・統計分析からは、プラズマの検出と共に、系の振動による成分の解析も行っている。それによって、機械振動を抑制するべく、光学架台を引き続き改善することは、ハルトマンスポット幅の分解能をより高めるために有効であることが分かっている。空気の揺らぎによる影響も少なくないことがわかり、空気流を抑えるために光学系の囲いの密閉度を上げることも効果が期待できる。また、昨年度の報告では、プラズマを挟んで共振器を構成して多光束干渉させ、揺動による位相変化を増幅させるアイデアを示している。本年度は、まず最もシンプルな複数回のレーザー光の折り返し光学系でデータを取得したが、本アイデアを検証するために共振器光学系の検討・発注も行っている。今後、入射光学系を変更し、検証実験を行う予定である。また、フォトニック結晶光渦マスクを用いた微小波面計測の試みについても、光渦マスクの検討は完了し、納品を待った後に有効性の検証を実施する予定である。

顕微鏡を用いた分子揺動計測については、昨年度、高強度の点光源と牛乳を用いてコロイド揺動の計測に成功している。本年度は、プラズマ計測と同様に、波面センサーへの高感度カメラ導入を進め、そのための光学系の設計と機械加工を行い、図 8 に示す補償光学顕微鏡を構築して動作試験を進めている。その間、プラズマ乱流揺動の計測の実験によって、補償光学用の波面センサーを改良し光の微弱な位相変動を検出することに目途がついた。同様の手法について、タンパク質粒子などの分子揺動の計測に対して適用を図る。それらを踏まえ、生細胞観察に適用し、生細胞内の分子揺動観察に着手する。



図 8 補償光学顕微鏡における分子揺動観察実験系 (基礎生物学研究所)

平成 27-28 年の連携研究により、生体の分子揺動と共に、核融合プラズマの揺動に対する光を用いた非接触・高感度の計測実験を行い、基礎的なデータを得ることに成功した。異分野の一見異なる課題について議論と洞察を深め、補償光学・波面計測という形で具体化・明瞭化し、各分野から広く知見を集結し相乗効果を生むことが、新たなブレークスルーにつながりつつある。自然科学研究機構「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」の多大なる支援に感謝すると共に、これを第一歩として、今後引き続き、さらなる発展に向けて研究を進めたい。

## 業績リスト

### ①総説、著書

1. 秋山毅志、早野裕、服部雅之、玉田洋介、「講座 画像再構成とパターン認識の数理 5. 新たな計測へ 5.1 波面センサーによる密度揺動計測」、プラズマ・核融合学会誌 92 (12)、912 - 916 (2016 年)

2. Y. Tamada and M. Hattori, Adaptive optics microscopy for fine imaging of live plant cells, SPIE Newsroom. DOI: 10.1117/2.1201602.006335 (2016)
3. 玉田 洋介、早野 裕、服部 雅之、「超解像深部ライブイメージングを可能にする補償光学」、初めてでもできる！超解像イメージング、岡田康志 編、羊土社 (2016)
4. 玉田 洋介、早野 裕、服部 雅之、「天文学の補償光学で生物の深部を観察」、日経バイオテク 2016.6.27 37-39 (2016)

## ②国際会議発表

1. M. Hattori, "A Test Bench of General Purpose Adaptive Optics and its Application to Microscopy", Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC/OPIC), Yokohama, May 19th, 2016.
2. M. Hattori and Y. Tamada, "The development of an adaptive optics system and its application to the biological microscope", SPIE Photonics Asia, Beijing, Oct. 12th, 2016.
3. Y. Tamada and M. Hattori, "Adaptive Optics Microscopy for High Resolution Imaging of the Stem Cell Formation in Plants," International Symposium on Optical Memory, Kyoto, Oct. 17th, 2016.
4. M. Hattori and Y. Tamada, "Studies on adaptive optics and application to the biological microscope", 3rd International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems, Tokyo, Nov. 18th, 2016.
5. Y. Tamada and M. Hattori, "Adaptive optics microscopy: Towards high resolution imaging of the fertilization in living plants", JSAP-OSA Joint Symposia 2016, The 77th JSAP Autumn Meeting, Niigata, Sep. 13th, 2016.

## ③国内会議発表

1. 秋山毅志、稲垣滋、玉田洋介、服部雅之、村田隆、亀井保博、野中茂紀、大屋真、早野裕、「シヤック・ハルトマンセンサーの拡張による分子生物学的揺らぎとプラズマ揺動の計測」、OPJ2016、東京、2016年10月31日～11月1日

## <その他特記事項>

### ○シンポジウム開催

1. Y. Tamada and M. Hattori, International Symposium "Adaptive Optics: Pushing the boundaries of deep imaging in living cells and tissues" at Biomedical Imaging and Sensing Conference 2016 (BISC'16), Yokohama, May 19th, 2016.
2. 亀井保博、高見英樹、早野裕、武田光夫、山本裕紹、服部雅之、村田隆、野中茂紀、玉田洋介、第11回NIBBバイオイメージングフォーラム「光学と生物学の融合によって切り拓く新しいバイオイメージング」、岡崎、2017年2月14, 15日(予定)

### ○産学連携

1. A 株式会社(秘密保持契約にて社名記載不可)との新規イメージング法の研究開発
2. B 株式会社(秘密保持契約にて社名記載不可)との新規イメージング法の研究開発にむけた情報交換