



5. 新たな計測へ

5. Prospect for New Diagnostics

5.1 波面センサーによる密度揺動計測

5.1 Electron Density Fluctuation Measurements with a Wavefront Sensor

秋山毅志, 早野 裕¹⁾, 服部雅之²⁾, 玉田洋介²⁾

AKIYAMA Tsuyoshi, HAYANO Yutaka¹⁾, HATTORI Masayuki²⁾ and TAMADA Yosuke²⁾

核融合科学研究所, ¹⁾国立天文台, ²⁾基礎生物学研究所

(原稿受付: 2016年8月22日)

光の波面の再構成法と, そのプラズマ計測への応用について述べる. 波面センサーの一つであるシャックハルトマン波面センサーは, 光の波面(等位相面)を集光スポット位置の変化として2次元検出するセンサーである. 元々, 望遠鏡の解像度を向上させる波面補償光学で開発が進められた機器であるが, 近年ではプラズマの電子密度・揺動計測手法に適用が開始されている. 本講座ではその波面センサーの原理とこれまでの適用例を紹介しつつ, プラズマの電子密度・密度揺動計測の試みを解説する.

Keywords:

Wavefront sensor, telescope, microscope, plasma, fluctuation measurement

5.1.1 はじめに

プラズマの屈折率は電子密度に依存するため, プラズマ中を透過するレーザー光の位相速度は電子密度によって変化する. それを利用したのが干渉法による電子密度計測であり, プラズマ内, 及び外を透過したレーザー光(それぞれ, 探査光, 参照光)の間に生じた位相変化から電子密度を評価する. ここで用いられる光検出器は, 電磁波の位相を直接検出することができないため, 位相変化を強度変化等に変換して検出を行う. 例えば, 電子密度干渉計測で最も初歩的なホモダイン干渉計は, 探査波と参照波を重ね合わせ, それによって生じる強度(コントラスト)変化から位相の変化を評価する. 電子密度揺動計測手法の一つである位相コントラスト法[1]は, 電子密度揺動で散乱された1次光と, 非散乱成分であるゼロ次光との間に, 位相差板を用いて位相差を与え, 位相変化を強度変化に変換して揺動成分の検出を行っている.

本講座で紹介するシャックハルトマン波面センサー[2]は, 観測光波面(等位相面)の2次元形状を強度分布変化として測定する. 後述のように, 波面センサーは元々大型望遠鏡にて空気揺らぎによる解像度の低下を解決するための「補償光学」[3, 4]の構成要素として開発が進められ, 大きな進歩を果たした技術である. その後, 波面センサーは眼の収差測定に適用され[5], 現在実際の医療現場で使用されている. また, 近年では生体の顕微鏡観察のライブイメージング[6]に取り入れられ, 解像度の改善に大きな成

果を挙げている.

本稿では, プラズマ分野では比較的目新しい技術である, 波面センサーの原理と現在の利用例について紹介する. 更に, 現在筆者らが進めているプラズマの揺動計測手法としての試みについても紹介する.

5.1.2 波面計測の原理

5.1.2.1 波面センサー

光の波面形状を測定する波面センサーには, シャックハルトマン波面センサー, 波面曲率センサー, ピラミッドセンサーなどがある[2]. ここでは, 最も広く用いられているシャックハルトマン波面センサーについて原理を紹介する.

シャックハルトマン波面センサーは, CCDやCMOSなどの撮像素子とその前面に配置したマイクロレンズアレイからなる. 観測対象からの光の波面が歪みの無い平面波であった場合, 図1に示すように撮像面にはマイクロレンズアレイの形状に応じた等間隔の集光スポット(ハルトマンスポット)が形成される. 観測対象物, 若しくは何らかの擾乱によってレーザー光断面に位相変化が生じて波面が乱れた場合, 各レンズアレイに対する光束の入射方向が変わるため, ハルトマンスポット位置は不規則になる. この位置の変化より, 入射波面形状の情報を得ることができる.

5.1.2.2 波面再構成

前述のハルトマンスポットの位置情報から, 以下のようにして波面を再構成することができる[4]. ゼルニケ多項

corresponding author's address: National Institute of Natural Science, National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

corresponding author's e-mail: takiyama@nifs.ac.jp

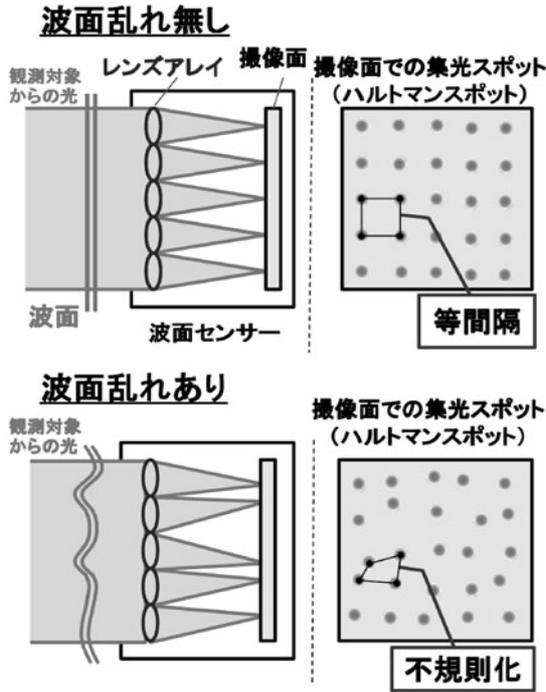


図1 シャックハルトマン波面センサーの測定原理.

式 $Z_n^m(X, Y)$ を用いて、入射等位相面 $W(X, Y)$ を近似的に

$$W(X, Y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i c_i^{2j-i} Z_i^{2j-i}(X, Y) \quad (1)$$

と表現する。ゼルニケ多項式は光学分野でよく用いられる直交多項式であり、図2 [7]に示すような関数形で、各項が収差に対応する。例えば、 Z_0^0 は平面波、 Z_1^{-1} 、 Z_1^1 は波面の傾き成分、 Z_2^{-2} 、 Z_2^2 は非点収差成分、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 はコマ様収差、 Z_4^2 は球面収差など、サイデルの収差に良く対応している。

ハルトマンスポットの変位を $(\Delta x, \Delta y)$ 、マイクロレンズの焦点距離を f とすると、波面と位置ずれの関係は

$$\frac{\partial W(X, Y)}{\partial X} = \frac{\Delta x}{f}, \quad \frac{\partial W(X, Y)}{\partial Y} = \frac{\Delta y}{f} \quad (2)$$

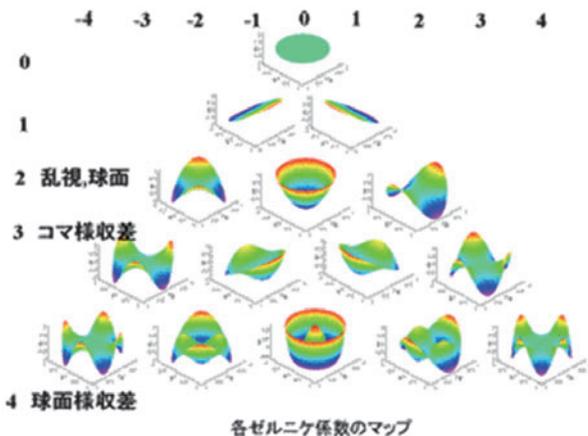


図2 ゼルニケ多項式の3次元表示 [7].

で与えられる。式(1)を式(2)に代入し、ゼルニケ係数 c_n^m を最小二乗法で求めることにより、波面を再構成することができる。

5.1.2.3 プラズマの電子密度評価

プラズマ計測に波面計測を適用し、電子密度を評価する場合は、以下のような簡易的な波面再構成手法も利用できる。これは、電子密度計測では計測系が持つ各種の収差の大きさを定量化することは重要ではなく、プラズマの有無での相対的な波面の変化を求めれば良いためである。図3に示すように、レンズ直径(ここではレンズ間隔と同じ)を d 、入射光の波長を λ とする。 i 番目のレンズアレイにおいて、プラズマが無い場合の等位相面に対する位相差を $\Delta\phi_i$ と置くと、ハルトマンスポットの変位との関係は、

$$\Delta x_i = f \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\Delta\phi_i}{d} \quad (3)$$

となる[8]。これより、 k 番目のレンズアレイ位置における位相差 ϕ_k は、

$$\phi_k = \sum_{i=1}^k \Delta\phi_i = \sum_{i=1}^k \frac{2\pi d}{f\lambda} \Delta x_i \quad (4)$$

と与えられ、プラズマによって生じた位相変化は、ハルトマンスポットの位置の変位量として求めることができる。プラズマによる位相変化 ϕ は、

$$\phi = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \lambda \int n_e dl \quad (5)$$

で与えられるため、位置変化から算出した位相変化より、電子密度が評価できる。また、後述の通り、電子密度の揺らぎは、ハルトマンスポット位置の揺らぎとなって観測される。

5.1.3 波面計測の利用例

5.1.3.1 大型天体望遠鏡

夜空の星が瞬いて見えるのは、大気の揺らぎによって天体からの光の波面が乱されるためである。天体はほぼ無限遠に存在する上に宇宙空間は擾乱がないため、大気圏に到

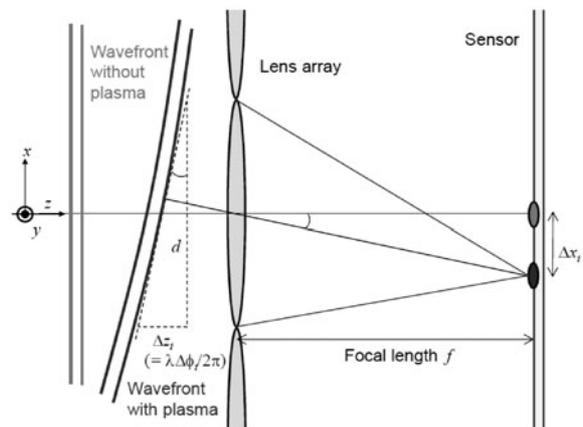


図3 ハルトマンスポットの変位と位相変化の関係.

達する光の波面はほぼ平面波とみなせる。一方、地上の大気は空間的に温度や密度、大気圧にムラがあり、これらは屈折率の不均一性をもたらす。大気圏に到達した平面波は、大気中を伝播することで、屈折率の不均一性によって屈折が生じたり、等位相面に乱れが生じたりすることになる。

望遠鏡は口径を大きくすればするほど解像度が上がるため、これまで大口径化が進められてきた。しかし、地上の望遠鏡の実際の解像度は、回折限界で決まる値よりも低く、これは大気揺らぎによる波面乱れが原因である。等位相面である波面に乱れがある場合、点光源からの光は回折限界で決まるスポットに収束せず、広がり歪みを持つことになる。したがって、実際の望遠鏡の解像度は大気による波面乱れが決めている。マウナケア山など高山の上に建設されている。すばる望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡は、大気揺らぎの影響の少ない立地を選んでいる。しかし、それでも波面乱れの影響は大きい。そこで考案されたのは、大気によって乱された波面を平面波に戻す「補償光学」であり、その概念図を図4に示す[9]。補償光学は、先に述べた波面形状を測定する波面センサー、乱れた波面形状を補正する可変形鏡、及び両者を繋ぐ帰還制御装置からなる。可変形鏡は薄いミラー面の裏側に取り付けられた多数のアクチュエーターにより、ミラー表面形状を任意に変えることができる特殊なミラーである。望遠鏡に入射した光を波面センサーへ分岐し、制御装置で乱れた波面形状の再構成とそれを平面に戻すための最適ミラー表面形状を演算する。その信号を元に実時間で可変形鏡の形状を変え、波面の乱れを補正している。すばる望遠鏡では2000年より補償光学系の運用を開始し[10]、これまで大幅な解像度の改善

補償光学を用いた望遠鏡の高解像化

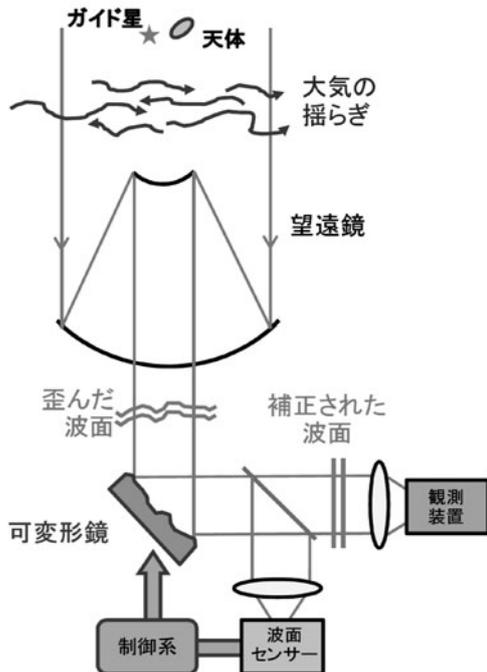


図4 補償光学系を導入した大型望遠鏡[9].

に成功している。その一例が図5であり、補償光学系によって二重連星を分離することに成功している[9].

5.1.3.2 細胞のライブイメージング計測

「ライブイメージング」とは、蛍光タンパク質などを標的とし、細胞を生きたまま顕微鏡で観察する技術である。組織を加工して対象物のみ観察する従来のイメージングと異なり、ライブイメージング観測では図6に示すように蛍光体（ここでは葉緑体）からの光は様々な構造体を通過する。それぞれの細胞内小器官は、異なる屈折率を持つため、位相変化の不均一性や境界で屈折が生じる。また、細胞内に存在する微小な油滴や多糖などはより高次の光の乱れを引き起こす。このように、大気揺らぎによる望遠鏡での解像度低下と同様に、細胞内構造体は顕微鏡の解像度の劣化をもたらす。

この課題に対して玉田、早野、服部らは、自然科学研究機構の「若手研究者による分野間連携研究プロジェクト」を通し、大型望遠鏡で開発した補償光学を元に顕微鏡に合わせた独自の工夫を加えて応用し、解像度の向上を図った。図7に示すように、補償光学を動作させた場合は蛍光タンパク質で標識した細胞核の境界が鮮明になり、またクロマチン（染色質）と呼ばれるDNAとタンパク質の複合体の構造に起因するスペックルが明瞭に観察できるようになった[11]。補償光学顕微鏡では観測対象物からの光が微弱であるため、微弱光に対する波面センサーの検出感度向上が課題の一つとなっている[4].

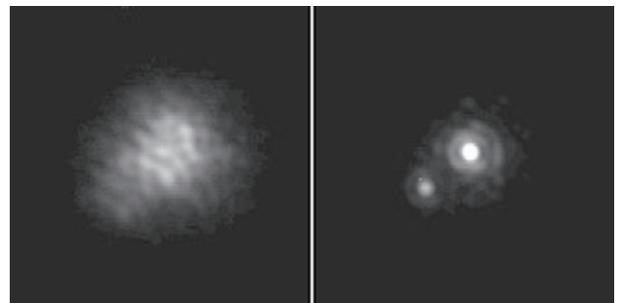


図5 補償光学系の有無による星像の改善例（二重星 HR 1852）。左：補償光学を動作させていないとき、右：補償光学が動作しているとき[9].

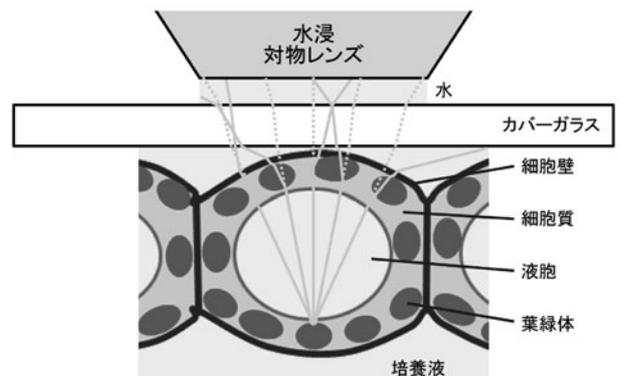


図6 細胞の顕微鏡観察での光線屈折。細胞下部から対物レンズに伸びる点線は、光が乱れなく対物レンズに入射した場合の光線、実線は光が細胞内小器官によって乱された場合の光線の模式図をそれぞれ示す。

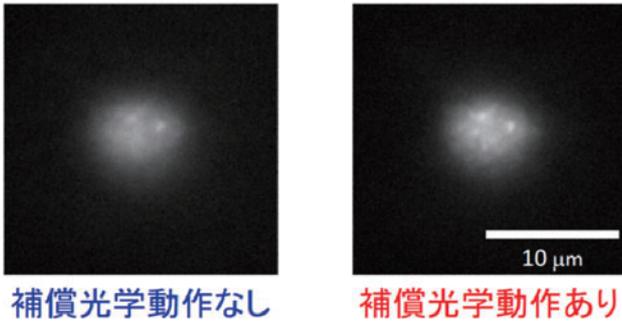


図7 補償光学有り無しでの細胞核の蛍光像。

5.1.3.3 眼球の収差の測定

近視や乱視は眼の収差によって引き起こされ、その補正には古くからメガネやコンタクトレンズが使われている。これに対し、屈折矯正手術とは眼の収差を手術的に矯正する方法であり、LASIC（レーシック）として広く知られるようになった。最近では、図8のように眼の収差を予め測定し、その収差を最小にするよう矯正手術するのに波面センサーが利用されている。

5.1.4 プラズマ計測への適用

5.1.4.1 アークプラズマ計測

大電流遮断器では機械的な遮断を行った後も、発生するアーク放電によって電流遮断ができないことがあるため、ガス吹き付け等による消弧が行われている。そのアークプラズマの消弧過程では電子密度が重要な寄与を果たしていると考えられており、効果的な消弧手法の開発には電子密度の測定が必要とされている[12]。遮断器での電子密度計測では、高電圧放電であるために静電プローブの利用は難しい。また、再現性の無い過渡的なプラズマであることから、計測位置が定点であるトムソン散乱計測は限定的な使用になる。一方、波面計測による電子密度は非接触計測であり、プラズマの発生領域よりレーザー光を十分広げておくことで、放電経路が放電毎、また時間的に変化しても計測が可能である[8]。

図9に波面センサーを用いたアークプラズマの電子密度計測の光学系を示す[13]。大気中の放電の場合、計測される位相変化は式(5)にイオン密度及び中性粒子密度の寄与が加わる。ただし、それらは電子密度項と違って波長依存が無いため、図9のように2波長同時計測によって、波長

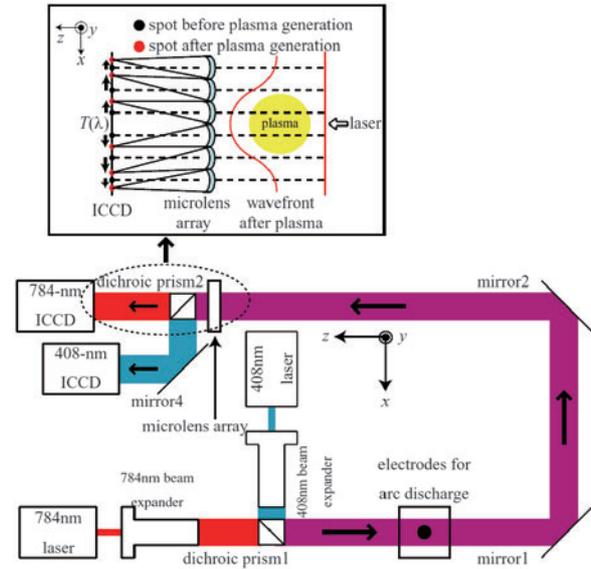


図9 波面センサーによるアークプラズマの電子密度計測の光学系[13]。

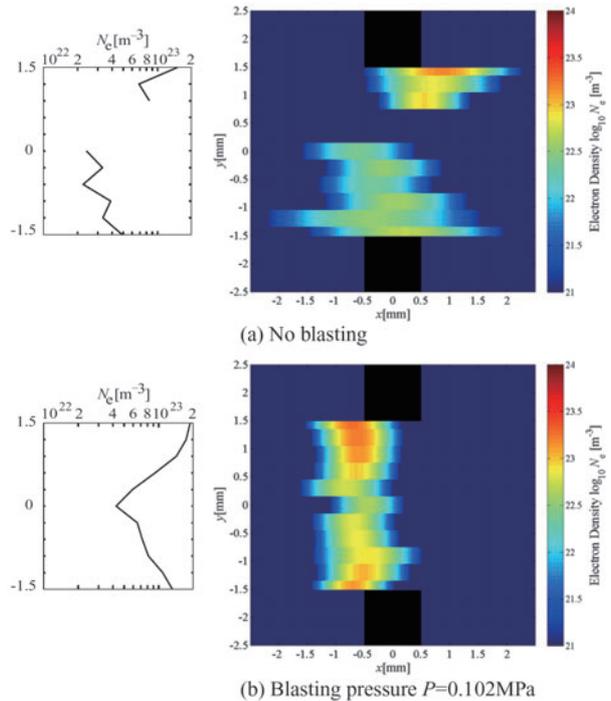


図10 波面センサーによるアークプラズマの2次元電子密度分布。空気の吹きつけ(a)無し、(b)有り[13]。

依存のある電子密度成分を非波長依存成分から分離して評価することができる。また、遮断器でガスによる点弧、消弧特性を研究する上で、中性粒子密度がわかることも有益である（イオン密度の寄与は十分小さい）。図10に波面センサーで計測した、ギャップ間に発生したアークプラズマの2次元電子密度分布を示す。消弧を効果的にするために空気の吹きつけの有無を比較すると、空気吹きつけをした場合はプラズマ径が細くなる様子を捉えることに成功している。

5.1.4.2 プラズマ揺動計測

プラズマの揺動はエネルギーの散逸を引き起こし、核融

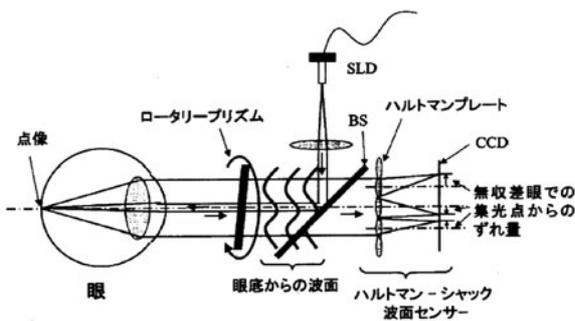


図8 波面センサーを用いた眼の収差測定[7]。

合プラズマでは高温高密度化を妨げる要因となっている。古くから揺動の物理機構の理解のため、様々な揺動計測法が開発されてきた。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」により、筆者らの研究グループは波面センサーによる電子密度揺動計測を提案している。波面センサーによる電子密度計測は、前章5.1.4.1のアークプラズマ計測で既に実証済みである。揺らぎ計測という点では、大型望遠鏡で大気揺らぎの計測・補正で実績があり、位相変動をもたらす媒質が大気かプラズマかの違いだけである。波面センサーによる電子密度揺動計測は、他の手法であれば複雑な光学系、変調技術を要するのに対し、前章5.1.4.1と同様に非常にシンプルな光学系で揺動の情報を得られることが利点である。レーザー光軸に沿った線積分情報であるものの、カメラ計測により、容易に電子密度揺動の2次元像が得られる点でも、波面センサーによる密度揺動計測は有益である。

密度揺動の周波数は数 kHz から MHz 程度であるのに対し、CCD または MOS を使う波面センサーのフレームレートは kHz 程度しかなく、そのままでは周波数の高い揺動計測は難しい。これらの撮像素子では、各ピクセルに入射した光子が露光時間中に積算される。そのため、揺動周期数より十分長い露光時間をとることで、その間のハルトマンスポットの微小かつ高周波の位置変動が各ピクセルに強度情報として蓄積され、図11に示すようにハルトマンスポット径の広がりとして現れる。つまり、密度揺動が大きいとハルトマンスポット径が大きくなり、スポット径の広がりに対応する2次のモーメントをハルトマンスポット毎に評価することで、フレームレートより高速の密度揺動でも揺動振幅の二乗平均平方根に近い値を得ることができる。このように、波面センサーは、探査光の位相揺らぎを強度変化、とりわけハルトマンスポット「形状」から測定し、2次元の電子密度揺動分布が得られる可能性を持つ。

現在、九州大学応用力学研究所の直線プラズマ装置 PANTA にて、原理実証実験を進めている。波面センサーを構成する撮像素子、及びレンズアレイの帯域は、近赤外領域までであるため、光源レーザーには波長 1064 nm の YAG レーザー、若しくは 635 nm の半導体レーザーを用いている。PANTA 装置で予想される波面の変動は、概ね波長の 1/700 程度であるのに対し、市販の波面センサーの感度は 1/100 程度である。そのため、波面分解能の向上が課題であり、プラズマ計測に合わせた撮像素子、及びレンズアレイの最適化を進めている。

5.1.5 まとめと展望

補償光学の重要な構成要素である波面センサーは、すばるをはじめとする大型望遠鏡や顕微鏡観察での解像度向上のみならず、現在では医療用途など様々な分野で適用が進められている。これに伴って、市販の波面センサーも増え、性能も年々向上してきている。シャックハルトマン波面セ

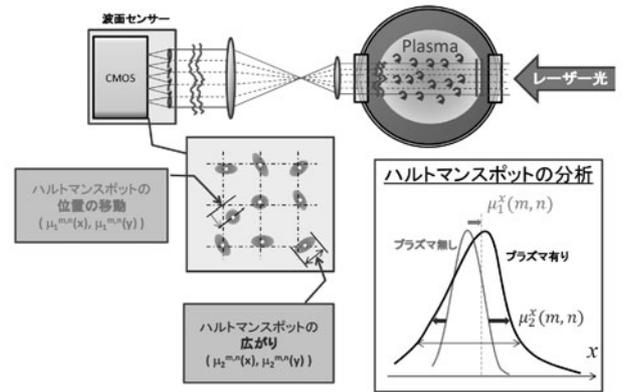


図11 波面センサーを用いたプラズマの密度揺動計測の光学系と、密度揺動によるハルトマンスポットの変化。

ンサーは、探査光の位相変化を集光スポットの位置・形状変化に変換して計測するもので、プラズマの電子密度、及びその揺動の2次元計測法として大きな可能性を有している。波面計測はプラズマ計測手法として適用が始まったばかりであり、現状ではセンサーの最適化が十分ではない。現在、稲田らや筆者らによってプラズマ計測のために様々な改良が行われており、今後、分野横断的な協力の下、センサー性能の向上とその応用研究が期待される。

謝辞

本節を執筆するにあたり、波面計測によるアーク放電プラズマの電子密度計測について、埼玉大学の稲田優貴博士と議論し、大変有益な情報、コメントをいただきました。心より感謝申し上げます。本節で扱った顕微鏡観察への補償光学導入、及びプラズマ電子密度揺動計測は、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」、及び九州大学応用力学研究所共同研究の支援によるものです。

参考文献

- [1] K. Tanaka *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E702 (2008).
- [2] Jose Luis Santos and Faramarz Farahi, *Handbook of optical sensors* (CRC Press, 2014).
- [3] 家 正則：光学 **22**, 408 (1993).
- [4] 服部雅之, 早野 裕：光学 **44**, 370-378 (2015).
- [5] 広原陽子 他：VISION **13**, No.2, 99-105, 2001.
- [6] T. Murata *et al.*, Nat. Commun. **4**, 1967 (2013).
- [7] <http://www.lasik.gr.jp/old/update2/main.html>
- [8] 福地哲生 他：電気学会論文 A **122**, 11 (2002).
- [9] 国立天文台提供：http://subarutelescope.org/Pressrelease/2002/01/16/j_index.html
- [10] http://subarutelescope.org/Pressrelease/2000/12/02/j_index.html
- [11] 玉田洋介：光学 **44**, 384 (2015).
- [12] Y. Yokomizu *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **22**, 129 (1989).
- [13] Y. Inada *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **47**, 325204 (2014).

講座執筆者紹介

第4章



さいとう なおき
斎藤直樹

1982年東京大学工学部計数工学科卒業。1984年同大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。1984-86年日本シュルンベルジェ(株)。1986-97年シュルンベルジェードル研究所(米・コネティカット州)。1994年イエール大学大学院数学科・応用数学博士課程修了。Ph.D. 1997年-2001年カリフォルニア大学デイヴィス校数学科准教授。2001年同校教授、現在に至る。応用・計算調和解析の研究に従事。趣味は多種の楽器演奏。https://plus.google.com/+NaokiSaitoMathMusicも参照して下さい。

第5.1章



あきやま つよし
秋山毅志

核融合科学研究所 准教授。色々興味はあるのですが、ここ最近には主にレーザーを使った計測器の開発・設計をしています。核融合研究の共同研究や、自然科学研究機構の分野間連携研究プロジェクト、日米協力、ITERなど、様々な先生方と一緒に仕事をさせていただく機会が増えました。技術面でもマネジメントの面でも、いつも目からウロコのことばかりで、共同研究や分野間交流の重要性を実感しております。



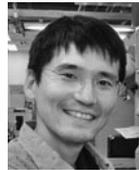
はやの ゆたか
早野裕

自然科学研究機構国立天文台先端技術センター・准教授。専門は補償光学、光学赤外線天文観測装置の研究開発。近年は補償光学をさらに発展させ、生体ライブイメージング、プラズマ計測などへの応用にも挑戦している。



はつとり まさゆき
服部雅之

自然科学研究機構基礎生物学研究所(2013年～) 研究員。補償光学を中心に、光学に関する研究を続けている。早稲田大学理工学部 助手(1998年～)、通信総合研究所 研究員(2001年～、現、情報通信研究機構)、自然科学研究機構国立天文台研究員(2003年～)。近年は、すばる望遠鏡の補償光学系に携わったのち、生物の研究所で光学顕微鏡用の補償光学の研究を本格的に進めている。



たまだ ようすけ
玉田洋介

基礎生物学研究所 助教。2005年京都大学大学院生命科学科博士課程修了。専門は発生生物学で、「細胞の運命がいつ、どのように変わるか?」という疑問を、主に植物の受精や幹細胞化に着目して解明しようとしている。細胞の運命が変わる瞬間を精細に観察するために、様々な光学系を顕微鏡に取り入れようと勉強中。

第5.2章



あらかわ ひろゆき
荒川弘之

帝京大学福岡医療技術学部診療放射線学科 助教。現在はプラズマ乱流・計測の研究と共に、医療用CTの被ばく減少・画質改善へ向けた研究も行っています。別の分野では、研究に対してアプローチの仕方が異なっていたり、一歩も二歩も進んだ手法が用いられていたりしていろいろ勉強になります。様々な分野の研究手法を取り入れながら新しい研究を進めていけたらと日々考えています。