

## 座談会：フォトダイナミズムの現状と将来

服部 雅之\*・玉田 洋介\*\*・早野 裕\*・三浦 則明\*\*\*

**三浦** フォトダイナミズムには、大気や生命など実世界のゆらぎ媒質のダイナミズムと、そうした媒質を通過して乱れた光をアクティブに補正する可変形鏡や空間光変調器など光学素子のダイナミズム、両方の意味が含まれています。フォトダイナミズム研究グループは、補償光学 (adaptive optics; AO) を核となる技術とし、抜本的な高解像イメージングを実現することを目的として、特に天文学、光学、生物学分野の異分野融合を進めています。今回は、同グループで活動されている研究者の方にご参加いただき、存在の意義を振り返りつつ今後を考える機会にしたいと思います。

### 1. フォトダイナミズムのこれまで

**三浦** よろしくお願ひいたします。まず、自己紹介を兼ねて、各自の現在の研究について簡単に紹介してください。

**服部** すばる望遠鏡の AO 装置において波面の最適制御の研究をしていました。その後、わが国からは報告のなかった生物顕微鏡用に AO の研究と開発を始めました。

**玉田** 植物の幹細胞化をイメージングで解き明かすことが目的です。細胞や組織の奥を観察しようとする、ゆらぎ・屈折・散乱のためきれいに見えなくなるという現象に悩まされています。それを解決するために、AO を生きた生物に適用しようとしています。

**早野** すばる望遠鏡 AO 用のレーザーガイド星 (波面計測用の参照光源) の研究を主として、AO 開発全般に携わっていました。現在は 30 m 望遠鏡計画の近赤外線撮像分光装置の開発をしつつ、高コントラストイメージングの新しい方法の開発も行っています。

**三浦** 皆さんの研究に関連して、現状の問題点はどのあたりにあるでしょうか？

**玉田** 生物は、マイクロメートルからナノメートルスケールまでのさまざまな構造が混在する非常に複雑な組織です。そうした複雑な組織を光波が通過すると、屈折から

散乱まで、大きく乱れてしまいます。このため、天文用 AO をパラメーターだけ変えて単純に植物に適用する試みはあまりうまくいっていません。もうひとつの問題は、波面計測の参照用の光源をどのように得るかですね。従来からの方法に加えて、AI を使ったり、音響効果を使ったりと新しい方法は出てきていますが、現状でもやはり一番のネックになっているところです。

**早野** 天文用 AO のひとつの方向性は広視野化です。地表層のゆらぎだけを補正することで、広視野での波面補償が可能になります。問題は地表から上空までのゆらぎが重畳している中で、地表層のみの情報をどれだけ精度よく計測できるかですかね。一方、系外惑星検出のために高精度な装置の開発も進んでいます。すばる望遠鏡の系外惑星用 AO はいろいろな機能が追加され、見た目は「ハウルの動く城」のようになっています。(一同笑)

**服部** 主星に比較して非常に暗い惑星を検出するための高コントラスト観測を、その前段の AO も含めて大気ゆらぎの速度に対してどれくらいの性能を出せるかが問題ですよね。

**早野** さらに、通常の AO は位相だけを補償するのですが、高精度の補償を実現するには振幅情報も使って波面補正しないと、系外惑星検出で重要なスペックルの軽減ができなくなるという問題もあります。解決するのは大変ですが、面白い分野でもありますね。

**玉田** 植物を観察している際、瞳の共役像を見るとかなり濃淡が生じています。一層の細胞の観察でもそうなので、多層になったときにはもっと深刻な問題になると思います。このような振幅のゆらぎ、シンチレーションをどう補償するかが、天文だけでなく、今後の生物用 AO のキーポイントになると思います。

**三浦** 服部さんは天文も生物も両方研究されていますが、両者に共通する課題についてどのように感じていますか？

**服部** AO の性能をどれだけ安定して出せるかですね。特に、生物 AO は天文に比べて歴史が浅く、不安定さの原因はまだはっきりわかっていません。先ほど話に出てき

\*国立天文台

\*\*宇都宮大学

\*\*\*北見工業大学 E-mail:miuranr@mail.kitami-it.ac.jp

たシンチレーションと、生体における散乱の影響が大きいと思っています。あと、究極的には波面計測の精度とノイズの扱いが効いているのではないのでしょうか。

## 2. フォトダイナミズムのこれから

**三浦** いま精度というお話もありましたが、ではどのような技術があればご自身の研究が進展するとお考えなのか、お話を伺っていきたいと思います。

**服部** 私がやりたいのは波面センサーの高度化ですね。高感度の撮像素子も出ているのでそれが利用できると思っています。あと、シャック-ハルトマン型ではなく、干渉計型の波面センサーを使えば感度は一桁上がるはずですよ。

**玉田** 補償素子のほうでは、生物の場合可変形鏡のストロークはもっと大きいものが欲しいです。また、SLM (spatial light modulator) くらいの素子数があると補正性能が格段に上がると思います。

**早野** LCOS (liquid crystal on silicon) を何段にも重ねて補正レンズを拡張するものを作ってくれないかなあ。

**三浦** アダプティブレンズのような技術を多層化できれば、多層共役 AO でも光学系がコンパクトにできると思うのですが。

**服部** 確かに、境界面の影響をうまく取り除いてくれるような三次元の補正素子が近めの未来にできればうれしいですね。波面補償素子については、反射や透過の効率がひとつの鍵ですが、可変形鏡のほかにまだ検討の余地がありそうですね。

**三浦** それでは、30年後に期待する技術・成果について教えてください。

**玉田** 生体中に自在に参照光源を作って、三次元的なゆらぎを計測できるようになればいいなと思います。これが実現できれば、AO のように波面補正してもよいし、位相共役にしたパルスレーザーを入射して、生体深部の蛍光体を二光子励起して観察することもできるようになります。生体深部を高解像度でイメージングできるようになれば、教科書を書きかえられるような成果がたくさん得られるだろうと思っています。現在の生細胞イメージングの多くは、何らかの侵襲性を伴う人工的な環境下で行われています。AOなどを駆使して、自然環境下での深部イメージングを実現したい。特に、私は幹細胞の運命が成長するにつれてどう移り変わっていくのかについて、最終的には明らかにしたいと考えています。

**一同** わくわくしますね！

**早野** 天文では地球型系外惑星の検出はもちろん重要なテーマです。そのためには、光波をスカラー波と近似する現状の AO から、複雑な媒質を伝搬してきたベクトル波として取り扱えるように理論構築し直す必要があると思います。30年後にさらに先に進むために、天体からの電磁波情報を、媒質によるゆらぎ下で背景光などのノイズの中からどうやって抽出するか、根本に立ち返って考える必要があると思います。ただ単に望遠鏡を大きくするとか、検出器の感度を上げればよいという方向性は限界に近付いている気がします。

**服部** ゆらぎ補正ができたとして、では何を見るのかという方向性は確かに重要ですね。

**三浦** 個人的な話で恐縮ですが、最近近いものが見えないことに加えて、一日のうちでも夕方になると乱視がひどくなり非常に物が見えにくくなります。どんなときでも焦点を合わせてくれる万能な AO メガネは作れないものですかね。補正素子は液晶で何とかかなりそう思うのですが。

**玉田** 私はできそうな気がします。問題は眼の状態をいかにして計測するかですね。

**早野** われわれが今やっている AO と違って瞬間瞬間の波面情報を計測する必要はなくて、時々眼の状態に合わせて補正量を変えたり、あるいはたまに眼科に行ってメガネをチューニングするだけでよいのでは？

**一同** そうだとすると、眼の計測については、ああやって、こうやって… (以下議論が続く)。AO メガネは将来作れそうですね！

**早野** 技術からスタートするのではなく、こうやって困っていることからスタートするのも大事な方向性ですね。ニーズからスタートして必要な性能が決められれば売れるものが作れるわけですよ。

**服部** AO メガネを作って、特許収入をグループ資金にしましょう。(一同笑)

**早野** われわれは天文学、光学、生物学分野の異分野融合を進めているわけですが、それをもっと広げていきましょう。例えば、脳科学と結びつけるのは面白いと思います。

**服部** 賛成です。分野間の連携から新しいものが出てくる可能性も少なくありません。むしろ異分野融合のほうが大事で、面白いことがたくさん潜んでいると思います。まだまだわれわれのやるべきことは多いですね。

**三浦** 本日はどうもありがとうございました。