イベント・ホライズン・テレスコープ　よくある質問

目次

1.　今回のブラックホール観測結果について
2.　イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）プロジェクトについて
3.　ブラックホールそのものについて
4.　望遠鏡について
5.　EHT における日本の役割について
6.　今後について

1　今回のブラックホール観測結果について

1.1　画像に写っている明るい環は何ですか？

ブラックホールの周辺には、高温のプラズマガスが存在しています。明るい環は、このプラズマガス（特に、ガスに含まれる電子）から発せられた電波です。ブラックホールの周辺では、光（電波）はブラックホールの強い重力によって進行方向が曲げられ、本来は地球とは別の方向に向かっていた電波も地球まで届きます。こうした光はブラックホールを回りこむような動きをしますが、ブラックホールからある距離まで近づくと、重力によって光はブラックホールに吸い込まれてしまいます。このため、ブラックホールの周囲のある範囲からは光がやってこない『影』のような状態になります。今回撮影された環の中の暗い部分は、こうしてできるブラックホールシャドウです。(プレスリリース 3 枚目の図も参照のこと。)

1.2 環が非対称なのはなぜですか？

環が非対称なのはブラックホールが回転しているからだ、と研究者たちは考えています。詳細な理論計算と今回の観測画像を比較したところ、電波を強く発するプラズマガスはブラックホールと同じ方向に回転している可能性が高いことが明らかになりました。一般相対性理論によれば、光速に近い速度で光源が移動している場合、光源はその進行方向に強い光を発することが知られています。今回の画像では下側（南側）が明るくなっていますから、今回観測されたブラックホールは画像下側（南側）が地球の方向に向かってくるような方向の自転をしている可能性が高いと考えられます。

なお、今回の観測だけでは自転の有無やその速度を完全に決定することができませんでした。ただし、M87 の中心部からは非常に強いガス流（ジェット）が出ており、そのエネルギー源はブラックホールの自転なのではないかと考えられています。また、いろいろな自転速度のシミュレーションを行ってみても、多くの場合で観測画像と一致する特徴が現れることもわかりました。イベント・ホライズン・テレスコープを用いて今後より精密な観測を行い、この謎を解き明かそうと研究者たちは検討を続けています。

1.3　M87 中心のブラックホールが観測対象に選ばれたのはなぜですか？

ブラックホールの『影』の見かけの大きさは、ブラックホールの質量と地球からの距離で決まります。宇宙には太陽の数倍から数十億倍までさまざまな質量のブラックホールがありますが、現在の望遠鏡技術で『影』を撮影できる可能性があるのは、太陽の数百万倍以上の質量を持つ巨大ブラックホールに限られます。

イベント・ホライズン・テレスコープの主要な観測対象として挙げられたのは、ふたつの巨大ブラックホールでした。ひとつは、私たちが住む天の川銀河の中心にある巨大ブラックホールで、「いて座 A スター」と呼ばれます。質量は太陽の約 400 万倍、地球からの距離は約 28,000 光年です。いて座 A スターが作る『影』の大きさは、およそ 50 マイクロ秒角（月面に置いたソフトボールを地球から見た時の大きさ）です。もうひとつは、おとめ座銀河団にある楕円銀河 M87 の中心に位置する巨大ブラックホールです。地球からの距離は約 5500 万光年、質量は太陽の約 62 億倍あるいは 35 億倍とされており、『影』の大きさは 38 マイクロ秒角（月面に置いたテニスボールを地球から見た時の大きさ）あるいは 21 マイクロ秒角（月面に置いたゴルフボールを地球から見た時の大きさ）です。2017 年のイベント・ホライズン・テレスコープの観測では、いて座 A スターと M87 中心ブラックホールが両方とも観測されました。

いて座 A スターは、M87 中心のブラックホールよりも速い時間変動があり、また地球との間にある別のプラズマガスによって電波の散乱が生じるため、解析と画像化において考慮しなくてはならない点が M87 よりも多くあります。このため、今回はこれらの影響がない M87 の画像を先に発表しました。いて座 A スターのデータ解析は、現在も慎重に進められています。

1.4　今回の観測に参加したのは、どの望遠鏡ですか？

APEX（チリ）、アルマ望遠鏡（チリ）、ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡（米国ハワイ）、サブミリ波干渉計（米国ハワイ）、サブミリ波望遠鏡（米国アリゾナ）、アルフォンソ・セラノ大型ミリ波望遠鏡（メキシコ）、IRAM30m 望遠鏡（スペイン）、南極点望遠鏡（南極）の 8 か所です。南極点望遠鏡は M87 の観測には使われていませんが、データを較正するための「較正天体」の観測には参加しています。

1.5　日本にある望遠鏡が参加していないのはなぜですか？

画像を得るには、望遠鏡が一斉に対象天体を観測する必要があります。今回観測に参加した望遠鏡の中ではアルマ望遠鏡が圧倒的に高感度であるため、アルマ望遠鏡と同時に観測できる望遠鏡群が使われました。アルマ望遠鏡があるチリから見ると日本は地球の反対側に位置するため、日本にある望遠鏡はアルマ望遠鏡と同時に同じ天体を観測することができません。このため、今回の観測には参加していません。

1.6　M87 の観測は、いつおこなわれましたか？

2017 年 4 月 5 日、6 日、10 日、11 日（日本時間）の計 4 回です。

1.7　今回の画像を得るための観測には、どれくらいの時間がかかりましたか？

1 日の観測は、およそ 8 時間（日本時間で午前 10 時ごろから午後 5 時ごろ）にわたって行われました。8 時間の間に地球が回転して各アンテナ間を結ぶ基線の向きが変化する効果を使って、画像化に必要な情報を集めています。しかし M87 を観測し続けていたわけではなく、較正天体と M87 を交互に観測する必要がありました。実際に M87 を観測していた時間を合計すると、一日あたり 40 分から 1 時間半程度です。

1.8 今回の観測で得られた望遠鏡の解像度はどれくらいですか？

解像度は 20 マイクロ秒角（1 マイクロ秒角は、角度の 1 度の 3600 分の 1 のさらに 100 万分の 1）です。人間の視力に換算すると「視力 300」万に相当し、月面に置いたゴルフボールが地球から見分けられるほどの解像度です。

1.9　今回の観測で得られたデータ量はどれくらいですか？

5 日間の観測全体で約 3.5 PB（ペタバイト＝10^15 バイト）です。M87 の観測に限ると、およそ 0.5 PB（500 TB：テラバイト）ほどでした。

1.10　今回のデータの相関処理はどこで行われましたか？

米国のマサチューセッツ工科大学ヘイスタック観測所とドイツのマックスプランク電波天文研究所の 2 箇所で分担して行われました。

1.11　2017 年 4 月に観測が行われ、画像発表までに 2 年もかかったのはなぜですか？

複数の電波望遠鏡で得られたデータを合成する相関処理とその後のデータ解析、そしてその確認に時間を要したからです。

まず、相関処理を行うためには世界中の望遠鏡からハードディスクに収められたデータを物理的に送る必要があります。データの発送に通常は 1 か月ほど、南極の場合は半年ほどかかりました。データが到着した後の相関処理では、各観測局で得られた電波データがぴったり重なるように試行錯誤を重ねる必要があるうえ、1 回の処理に観測と同じだけの時間がかかります。

データ解析では、いて座 A スターと M87 のふたつの最重要天体以外の天体について解析を行い、相関処理やデータの較正、画像の解析手法などがすべて正しく行われることを確認しました。2017 年の観測ではアルマ望遠鏡がイベント・ホライズン・テレスコープに加わったことで感度が大幅に向上し、それまでは見えなかった様々な観測装置由来のノイズも見えてきました。これらをひとつひとつ慎重に解析して、較正する作業が行われました。さらにデータ処理のプロセス毎に複数回の審査をイベント・ホライズン・テレスコープのチー

ム内で繰り返し行い、処理の妥当性を確かめました。さらに、データ較正や画像解析には、独立に開発されたそれぞれ 3 つずつのソフトウェアが使用され、独立したソフトウェアで同等の観測結果が得られることを検証しました。

これらが行われたのちに、初めていて座 A スターと M87 の解析が行われました。この解析が始まったのは、2018 年 4 月でした。その後、データ較正の審査が完了し画像合成チームにデータが渡されたのが 2018 年 6 月上旬でした。画像合成チームは独立な 4 つのチームからなり、互いに意見交換することなく 7 週間かけて画像合成を行いました。2018 年 7 月下旬に 4 つのチームの結果が初めて比較され、いずれのチームの結果でもブラックホールシャドウが写し出されていることがはっきりしました。このあとも、3 つの独立したソフトウェアで手法を少しずつ変えながら画像の合成を合計でおよそ 5 万回行い、ブラックホールシャドウが人為的な影響で作り出されているものではないことを確認しました。

1.13 今回の観測で画像が得られた要因は何ですか？なぜ 2016 年以前の観測では撮影できなかったのですか？

ブラックホールシャドウの画像を得るために必要なのは、十分な感度と解像度、そして画質です。「感度」は暗い天体（弱い電波）までキャッチできる能力、「解像度」は天体の細かい構造を見分けられる能力、「画質」は実際の天体の構造に忠実な画像を作り出す能力のことを指します。これらのいずれが欠けても、ブラックホールシャドウの画像を得ることはできません。

解像度をあげるには、望遠鏡の口径を大きくし、また観測する電波の波長を短くする必要があります。イベント・ホライズン・テレスコープでは、離れた地点にある望遠鏡をつなぎ合わせることで仮想的な電波望遠鏡を構成しています。この場合、より離れたところにある望遠鏡を組み合わせれば仮想電波望遠鏡の口径も大きくなります。2017 年の観測では最も離れた望遠鏡はスペインとハワイに位置しており、その間隔は約 10,000km にもなります。

次に感度を向上させるには、個々の望遠鏡の感度を向上させる必要があります。2017 年にはアルマ望遠鏡という超高感度の望遠鏡が初めてイベント・ホライズン・テレスコープに加わったため、全体の感度が大きく向上しました。また、その他の望遠鏡でも観測装置の改良によって 2016 年以前より感度が向上していました。

画質の向上には、様々な場所にある望遠鏡が参加することが重要です。2017 年の観測では、ハワイ・アリゾナ・メキシコ・チリ・スペイン・南極の 6 か所・8 望遠鏡が参加することで、天体の構造に関する情報を多く得ることができました。

これらが合わさることで、2017 年の観測では M87 のブラックホールシャドウを画像化することに成功しました。

2016 年以前の観測では、参加する望遠鏡が少なかったこともあり、ブラックホールシャドウを画像化するのに十分な情報が得られませんでした。この時のデータでは、天体がドーナツ状に中心に穴が開いているのか、それとも穴の開いていないフリスビーのような構造なのかを区別することができないほどでした。

1.14　天の川銀河中心のブラックホールも観測するということでしたが、こちらはどんな状況ですか？

いて座 A スターでは、M87 の中心にあるブラックホールよりも周囲の物質の変動が速いことが知られています。また、地球といて座 A スターの間に漂う星間プラズマによって電波が散乱されてしまうことも知られています。このため、データの解析と画像化において克服しなくてはならない点が多くあります。研究チームは、いて座 A スターのデータの解析を現在も慎重に進めています。

2　イベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）プロジェクトについて

2.1　イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトとは何ですか？

世界中にある電波望遠鏡を結合し、「ブラックホールシャドウ」を撮影するための国際協力プロジェクトです。

2.2　イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトには、何人の研究者が参加していますか？ そのうち日本の機関に所属する研究者は何人ですか？

イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトには、世界中から 206 名の研究者が参加しています。そのうち日本の機関に所属する研究者は 14 名 、海外の研究機関に所属する日本人研究者は 8 名 です。

2.3　イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトに参加している機関は、どこですか？

イベント・ホライズン・テレスコープ評議会（EHT Board）に代表者を出している機関は、以下の 13 機関です。

・中央研究院天文及天文物理学研究所（台湾）
・東アジア天文台
・ゲーテ（フランクフルト）大学（ドイツ）
・マサチューセッツ工科大学ヘイスタック天文台（米国）
・ミリ波電波天文学研究所（フランス・スペイン）
・アルフォンソ・セラノ大型ミリ波望遠鏡（メキシコ）
・マックスプランク電波天文学研究所（ドイツ）
・自然科学研究機構国立天文台（日本）
・ペリメーター研究所（カナダ）
・ラドバウド大学（オランダ）
・スミソニアン天体物理学観測所（米国）
・アリゾナ大学（米国）

・シカゴ大学（米国）
イベント・ホライズン・テレスコープに研究者個人として参加しているメンバーの所属機関は 76 機関にのぼります。

2.4　イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトはどのようにして発足したのですか？

遠く離れた電波望遠鏡を結合して仮想的な巨大電波望遠鏡を構成する技術（超長基線電波干渉計：Very Long Baseline Interferometer: VLBI）は、1967 年にカナダで初めて実現しました。その後、米国と欧州の望遠鏡、米国と欧州と日本の望遠鏡をつないだ VLBI 観測が 1980 年代に成功し、地球サイズの望遠鏡を実現するための技術的な素地が整って行きました。
イベント・ホライズン・テレスコープに関する初めての会合が持たれたのは、2009 年のアメリカ天文学会においてでした。その後の 2012 年、イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトを構成するパートナー機関が集った最初の会合がアリゾナで開催され、趣意書に署名が行われました。これと前後して、現在イベント・ホライズン・テレスコープに参加している各望遠鏡において、VLBI 観測を実現するための装置開発が実行されました。
ブラックホールシャドウを現実的に撮影できる能力を備えた観測が実行できるようになったのは、2017 年です。

2.5　EHT プロジェクトにはどれくらいのお金がかかっていますか？

イベント・ホライズン・テレスコープでは、既存の望遠鏡を一部改良してネットワークに組み込んでいます。このため、イベント・ホライズン・テレスコープのためだけにかかった望遠鏡運用費用を見積もるのは困難です。

3　ブラックホールそのものについて

3.1　ブラックホールとは何ですか？

ブラックホールとは、非常に大量の物質が極限まで狭い領域に押し込められた天体です。このためたいへん重力が強く、光さえも抜け出すことができません。光も一切出てこられないことから「真っ黒（ブラック）」で、あらゆるものを吸い込む「穴（ホール）」なので、「ブラックホール」と呼ばれています。

ブラックホールとその外側を分ける境界面（ブラックホールの表面）を、「事象の地平面（イベント・ホライズン：event horizon）」と呼びます。事象の地平面に達した場合は、光を含むあらゆるものがそこから抜け出すことができません。事象の地平面の外側の領域は、重力の影響が非常に強く時空間は大きくゆがんでいますが、光や物質がそこから逃げ出すことは可能です。このようなブラックホールのすぐ近くの領域からやってきた光や電波を捉えることで、ブラックホールそのものやブラックホール周囲の強重力環境についての情報を得ることができます。

イベント・ホライズン・テレスコープは、この「事象の地平面」のスケールまで見分けられる画像を撮影することを目指しているため、この名がつけられました。

3.2　ブラックホールはどのようにしてできたのですか？

太陽の数倍の質量を持つブラックホールは、太陽のおよそ 20 倍より重い恒星が核融合反応を終えて自重を支えきれなくなり、潰れて一点に収縮することでできると考えられています。このようなブラックホールは、私たちが住む天の川銀河の中にも多く存在すると考えられています。

一方、多くの銀河の中心には、太陽の数百万倍から数十億倍もの質量を持つ巨大ブラックホールが存在しています。巨大ブラックホールの成因は、未だによくわかっていません。宇宙の進化の中でブラックホールが周囲の物質を吸い込み続けて巨大になったのか、あるいは多くのブラックホールが合体することで巨大になったのか、いくつかの説があり、論争と研究が続けられています。

3.3 光を出さないブラックホールを、どのように観測するのですか？

ブラックホールは光も発しませんので、真っ暗な宇宙にブラックホールが単独で浮かんでいると、その姿をとらえるのは困難です。これまでに行われてきたブラックホールに関する観測は、いずれもブラックホールの周囲に存在するガスや星が放つ光や電波・X 線などをとらえることで、間接的にブラックホールについての知見を得ようとするものでした。

例えば、ブラックホールに吸い込まれていく物質は、ブラックホールの周囲に円盤（降着円盤）を作ります。ブラックホールの強い重力に引かれて円盤に落下してきた物質は、そのエネルギーを熱に変えることから、円盤は非常に高温になります。高温の円盤からはエックス線や可視光、電波などさまざまな電磁波が発せられます。これを観測することで、ブラックホールに関する研究を行うことができます。例えば、円盤に含まれるガスが放つ特定の波長の電波を観測すると、電波のドップラー効果からその回転速度を導き出すことができます。速く回転している物体には遠心力が強く働きますので、猛烈な速度で回転する円盤が飛び散ってしまわないということは、遠心力に負けないほどの重力で円盤を強く引き付ける非常に質量の大きな天体が中心に位置していると考えることができます。ブラックホールが存在するという間接的な証明は、このような観測によってもたらされました。イベント・ホライズン・テレスコープでは、ブラックホールのごく近傍に存在するガスが放つ電波を観測し、ブラックホールのごく近傍のようすを非常に高い解像度で画像化することによって、ブラックホールが存在することを視覚的に証明することが可能になりました。

最近では、ブラックホール同士が合体するときに発生する重力波をとらえることが可能になり、ブラックホールの新しい研究手段として注目を集めています。

3.4 ブラックホールはこの宇宙にいくつくらいあるのですか？

3.2 で述べたように、ブラックホールには恒星質量ブラックホールと巨大ブラックホール

の 2 種類があります。恒星質量ブラックホールは、私たちが住む天の川銀河の中で 15 個程度が発見されています。恒星質量ブラックホールは重い恒星の死によって作られることを考えると、天の川銀河の誕生から現在までの間（おそらく 100 億年以上の期間）に生まれて死んだ重い恒星の数だけブラックホールがあると考えられます。その総数は、およそ 1 億個という研究もあります。

一方、巨大ブラックホールは宇宙に存在するほぼすべての大きな銀河の中心にあると考えられています。銀河は宇宙の中に何百億個、何千億個もあるとされているため、巨大ブラックホールの総数も莫大なものになります。

3.5 EHT で画像が撮影できる可能性のあるブラックホールはいくつありますか？たくさんあるブラックホールのうち、一部しか観測できないのはなぜですか？

ブラックホールは宇宙に数多くありますが、現在のイベント・ホライズン・テレスコープでブラックホールシャドウの写真を撮影することが可能なものは、天の川銀河の中心にある「いて座 A スター」と楕円銀河 M87 の中心にある巨大ブラックホールのふたつです。
まず、天の川銀河の中にもたくさんある恒星質量ブラックホールは、質量が小さいため、シャドウも極めて小さくなります。地球からの距離が比較的近いものでも、そのシャドウの地球から観測した時の見かけの大きさは大変小さく、イベント・ホライズン・テレスコープで画像を撮影することはできません。

銀河の中心にある巨大ブラックホールは、質量が大きいためにシャドウも大きくなります。シャドウの見かけの大きさは、ブラックホールの質量と地球からの距離に依存します。いて座 A スターと M87 中心の巨大ブラックホール以外は、距離が遠かったり質量が小さかったりするためにシャドウはやはり小さくなり、イベント・ホライズン・テレスコープでそれらを画像化することはできません。

3.6 ブラックホールの中はどうなっているのですか？

いろいろな理論的研究がありますが、事象の地平面の内側の情報は一切出て来ないので、観測でそれを確かめることはできません。仮に内側に入って、状態を調べたとしても、そのことを外に出て誰かに伝えることはできません。一般相対性理論に基づいて想像すれば、これまでに事象の地平面内に吸い込まれた物質や光が中心の特異点（回転ブラックホールではリング状の特異点）に向かって運動し続けていることになります。

3.7 もし私がブラックホールに吸い込まれたら、何が起きますか？

アインシュタインの一般相対性理論によれば、事象の地平面は、何か物質的な壁のようなものではありません。巨大なブラックホールの場合には、その面を通過してもほとんど何も変わったことは起きません。ただ、振り返ってその外側に出られなくなるだけです。太陽程度の質量のブラックホールの場合は、人の頭と足にかかる重力が非常に大きく違うので、その力の差（潮汐力）で人が引き伸ばされてしまうことになります。

3.8 もし物体がブラックホールに吸い込まれるのを外から見たら、どのように見えますか？

事象の地平面に近づいていくと、そこからの光はどんどん外側に伝わるのが遅くなり、同時に弱くなっていきます。事象の地平面の内側に入ってしまうと、そこからの光はついに届かなくなってしまいます。したがって、物体が事象の地平面を通過する瞬間を外から観測することはできません。

3.9　ブラックホールを観測する意義は何ですか？

アインシュタインの一般相対性理論は、これまで弱い重力場についてのみ正しいことが確認されてきました。強い重力場で本当に正しいかどうかは、現代物理学の大問題の一つです。最近、重力波が初めて検出され、数十太陽質量のブラックホールが存在することが証明されましたが、それでもまだ事象の地平面のごく近くの時空が一般相対性理論と一致しているかどうかは確認できていません。イベント・ホライズン・テレスコープの観測は、重力波研究と相補的であり、巨大ブラックホールの事象の地平面のごく近傍の時空を光の伝播を通して調べ、それが一般相対性理論と一致しているかどうかを確認することができます。

強い重力場の理論は、宇宙の始まりを理解するためにも必要です。そこでは強い重力場の理論と量子力学の正しい融合が必要であり、それは未だに成されてはいません。

巨大ブラックホールは銀河の中心にあり、ブラックホールによる物質の加速、加熱、電磁場の増幅、それによるエネルギー放出が銀河全体の進化に多大な影響を与えます。実は宇宙で最も効率の良いエネルギー放出の場所は、恒星ではなく、ブラックホール近傍です。そのような場所でのプラズマの物理もまだ未解明な点が多く、銀河の進化の理解を妨げています。銀河中心の活動の中で最も顕著なものが、細く絞られたプラズマ噴出（ブラックホールジェット）です。M87 のジェットの観測的研究は東アジアが世界的にリードしてきました。ジェットは、ブラックホール自体のエネルギーを引き抜いて駆動されるという理論が有力です。イベント・ホライズン・テレスコープの観測によってこの理論が正しいかどうかも調べることができます。

4　望遠鏡について

4.1　超長基線電波干渉計（Very Long Baseline Interferometer: VLBI）とは何ですか？

VLBI とは、電波干渉計の一種です。望遠鏡の解像度（細かいものを見分ける能力）は、望遠鏡の鏡（電波望遠鏡の場合、アンテナの口径）の大きさに比例して良くなります。一つの巨大な望遠鏡を用意することができなくても、小さな望遠鏡を複数用意し、同時に同じ天体を観測して、それぞれの望遠鏡で取得されたデータをうまく（電波の位相を合わせて）結合することによって、望遠鏡間の距離に相当する仮想的な巨大な望遠鏡を形成することが可能です。これが電波干渉計で、ケンブリッジ大学のマーティン・ライル等によって考案・実証されました（マーティン・ライルは 1974 年にノーベル賞を受賞）。電波干渉計の多くは、望遠鏡同士をケーブルで結んで、ケーブルを通じて取得されたデータを一か所に集めて

います。集まったデータを相関器と呼ばれる計算機を使って合成することで、アンテナ群全体をひとつの巨大な望遠鏡として機能させることができます。

VLBI の場合、望遠鏡同士は何千 km と離れた場所に設置されている場合が多く、個々の望遠鏡はケーブルで互いに結ばれていません。代わりに、各望遠鏡で記録媒体（例えばハードディスク）にデータを記録します。そして後日、全望遠鏡の記録媒体を一か所に集め、相関器でデータを合成するための処理を行います。各望遠鏡でデータを取得・記録する際、正確な時刻情報を持ち合わせていないとデータ合成ができないので、VLBI を構成する望遠鏡はそれぞれに高精度の時計（原子時計）を持っています。

4.2　ブラックホールの画像を撮るのに、なぜ電波望遠鏡が必要なのですか？可視光望遠鏡やエックス線望遠鏡では撮影できないのはなぜですか？

今回観測されたブラックホールの周囲には、高温のプラズマガスが存在しています。そこからは、電波だけではなく、可視光や X 線も放たれていると考えられています。しかし、M87 のリングの差し渡しの大きさはおおよそ 40μ 秒角（1 秒角は 1/3600 度で 1μ 秒角はさらにその 100 万分の 1）と極めて小さく、これだけ小さなものを解像することができるのは、現在のところ電波望遠鏡をつなぎ合わせる VLBI 技術しかありません。したがって、電波望遠鏡が必要となったのです。

4.3　アルマ望遠鏡自体も電波干渉計ですが、具体的にどういう仕組みで、アルマ望遠鏡がイベント・ホライズン・テレスコープの観測に参加するのでしょうか？

イベント・ホライズン・テレスコープの観測には、約 40 台のアルマ望遠鏡アンテナが参加しています。これらのアンテナが個別に VLBI 観測の 1 局として参加しているわけではなく、フェーズアップと呼ばれる操作を行い、あらかじめ 40 台のアンテナで取られた信号を(電波の位相を調節して足しあげることで)あたかも 1 台の大型望遠鏡で観測したかのように合成します。そして合成したアルマ望遠鏡全体の信号を、他の観測局の信号とさらに合成することで地球規模の大きな望遠鏡を仮想的に構成する手順になっています。アルマ望遠鏡のアンテナの口径は 12m ですが、フェーズアップにより、口径約 70m のアンテナに相当する集光能力を発揮します。アルマは 2 つの直交する直線偏光（電磁波の偏りことを偏光とよぶ）信号を受信する仕組みになっていますが、フェーズアップする際に、円偏光信号に変換します。この処理にあたっては、2 つの直線偏光を高精度に見分ける能力が求められます。そのための基本的な試験や性能検証は、永井が牽引しました。

アルマ望遠鏡以外にも、イベント・ホライズン・テレスコープにはハワイの SMA という電波干渉計が参加しており、同様の方法でフェーズアップを行なっています。

5　EHT における日本の役割について

5.1　EHT の装置面で、日本はどのような貢献をしましたか？

イベント・ホライズン・テレスコープに参加した望遠鏡の中では、まずアルマ望遠鏡の建

設と運用に日本は貢献しています。また、ハワイ・マウナケアにあるジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡は、日本・韓国・台湾・中国などのアジア諸国が共同で設立した東アジア天文台によって運用されています。

イベント・ホライズン・テレスコープによる観測を実現するための装置開発としては、アルマ望遠鏡の40台のアンテナからの信号をフェーズアップ(合成)した信号(最大64Gbps)を、標高2900mの山麓施設にある記録装置に伝送するための光多重伝送装置の開発を行い、アルマ望遠鏡現地に設置しました。

5.2　EHTのソフト面（研究内容）で、日本はどのような貢献をしましたか？

電波干渉計では、地球上のいろいろな場所にある限られた数の望遠鏡を使って観測を行っています。このため、望遠鏡の最大展開範囲は地球サイズであったとしても、実際にはほとんどの場所ではデータを取れない（望遠鏡が存在しない）ということになり、「歯抜け」のデータしか得られません。こうした限られたデータをもとに画像化するために、これまでもいくつかの方法が開発されてきましたし、イベント・ホライズン・テレスコープの実現に向けて新たな画像化手法の開発も行われてきました。イベント・ホライズン・テレスコープでは、こうした複数の画像化法を用いてその結果を比較することで、画像の客観性や信頼性を高めています。

日本の研究者は、「スパースモデリング」と呼ばれる最新の統計手法に基づいた画像復元法の開発をリードしてきました。また日本のグループはブラックホールの画像の復元に用いられた3つのソフトウェアの一つであるSMILIと呼ばれるソフトウェアを開発しました。SMILI はスパースモデリングを積極的に応用した新しい画像化手法を実装しています。秋山を中心として、田崎、池田、本間、笹田、森山らが開発を行いました。またスパースモデリング のアイディアは他の画像復元チームにも採用され、ハーバード大学が開発したeht-imaging library と呼ばれるソフトウェアにおいても日本が開発してきたスパースモデリングが取り入れられて今回の画像化にも用いられています。

また単に手法やソフトウェアを開発するだけでなく、実際に画像化の一連のプロセスにも日本人が主導的な役割を果たしました。秋山は70人が参加する画像化の作業班全体の世話人を勤め、画像化の一連のプロセスをリードしました。またM87の画像復元に取り組んだ4チームのうち2チームは日本人によってリードされ（Team 2:秋山、Team 4:小山）、3チームに日本人が参加しました。

イベント・ホライズン・テレスコープの観測データの理論的解釈には、日本を含む東アジアグループの理論研究者も貢献しました。中村らは、独自に一般相対論的電磁流体シミュレーションを実行して色々な場合のプラズマの運動の傾向をつかんでいました。さらに、川島らは、一般相対性理論が適用される環境での電磁波の伝搬を計算するプログラムを開発し、国際チームで開発された同様のプログラムの動作検証に貢献しました。

今回観測されたM87は、中心部から非常に強力なジェットが出ていることが知られています。このジェットに関しては、東アジアVLBIネットワークを使った観測を東アジアの研

究者は積み重ねてきています。これまでの観測で得られたジェットと今回のイベント・ホライズン・テレスコープによる観測結果を整合的に理解するためのモデル構築を行い、ブラックホールとジェットの関係を明らかにするための研究を進めています。

5.3　スパースモデリングとは何ですか？

対象となる情報源にスパース性が仮定できる場合、それを利用した新しい情報処理の方法をスパースモデリングと呼びます。

観測された情報をもとに対象を復元する場合、条件が十分に得られない場合があります。そうした復元問題を劣決定な逆問題と呼びます。劣決定な逆問題であっても、対象にある種の仮定が成り立つならば、その仮定を満たす解のみを探せばいいことになり、逆問題が解ける場合があります。スパース性という仮定はそれまではあまり考えられてこなかった仮定でしたが、1990 年代にいくつかの理論的なブレークスルーがありました。その結果、1990 年代後半から情報学・統計学の分野において、関連した研究が理論とアルゴリズムの面から盛んに進められました。

バイオインフォマティックスの分野での応用を皮切りに、2000 年代にはいって、画像処理、医用画像の分野における応用がすすみ、実用化されるようになりました。この数年、そうした方法を総称してスパースモデリングと呼ぶようになりました。ここには国内の新学術領域研究科研費プロジェクトも大きく貢献しています。そのプロジェクトの中で、電波干渉計の画像復元法の開発も提案されました。これが EHT のためのスパースモデリングを用いた画像復元法の基礎となりました。

6 EHT の今後について

6.1 今後、EHT はどのような展開を予定していますか？それによって、何がわかりますか？

人類初のブラックホールシャドウの撮像は、一連の研究の始まりにすぎません。今回の観測によって、私たちはブラックホールシャドウの形を明らかにするほどの解像度に到達することができました。今後数年にわたってこの解像度で観測を続けることで、事象の地平面近傍からの光の時間変化を調べることができます。一般相対性理論の予言が正しければ、ブラックホールシャドウの大きさはブラックホールの質量と自転のみで決まっていて、時間変化しません。長期にわたる観測を実行することで、それを検証することができます。偏光や他の波長の電磁波などの情報も使って、一般相対性理論と異なる重力理論やブラックホール擬似天体の可能性をさらに厳しく精査できます。

イベント・ホライズン・テレスコープは今後も参加する望遠鏡の数を増やしていきます。これにより、より高い感度で M87 のブラックホールの周りの画像を得ることができます。今回の観測では、高速ジェットの根元と事象の地平面近傍のプラズマがどうつながるのか明らかになりませんでした。参加望遠鏡を増やすことでブラックホールシャドウだけでなく、その周りの高速ジェットの根元からの放射を検出できることが期待されています。これによって、高速ジェットの起源（シミュレーションが示しているように、本当にブラックホ

ールからエネルギーが抜かれているのか）を突き止めることが可能となります。東アジア理論班は独自の理論シミュレーション研究に基づいて、高速ジェットのデータと地平面近傍のデータをつなげる理論モデルを提案しています。その検証は、国際的な重要課題として今回発表した論文で位置付けています。

また観測波長を短くすることでれば（たとえば 0.85mm）、現在よりもさらに解像度が上がります。2017 年の観測で得られたぼやけた画像の解像度をあげることで、コンピュータシミュレーションが示しているような詳細な構造（ブラックホールシャドウを縁取る「フォトンリング」と、高速ジェットと落下するプラズマの構造）を検証できます。このことは今回の結論（見えているのがブラックホールシャドウであるということ）を裏付けるために決定的に重要です。

そして究極的には、望遠鏡を宇宙に置くことで、究極的な解像度を得ることができます。これにより、いて座 A スターや M87 以外の巨大ブラックホールの撮像も可能になると期待されています。その実現のための技術はどんどん進んでいますが、資金は未だ確定していません。