

サイエンスピックアップ

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡によって可能となった初代銀河探査

平成 24 年宇宙地球物理学科 (天文) 卒 カリフォルニア工科大学 Junior Staff Scientist 森下 貴弘



私達の宇宙は、およそ 140 億年前にビッグバンという現象から誕生したと考えられています。主に中性水素に満たされる空間から星が生まれ、たくさんの星が銀河を構成し、数千億もの数に及ぶ銀河に満たされる現在の宇宙へと進化を遂げてきました。その長い歴史の中の、ほんの最初の 10 億年の間に宇宙は「再電離期」と知られる一つの転換期を迎えました。その時代に存在した中性水素の殆どがプラズマ状態に遷移する、いわゆる「宇宙再電離」と呼ばれる現象です。この再電離期を終えてようやく、宇宙は星や銀河の光が自由に行き来できる状態になりました。

興味深いことに、この再電離減少の重役を担ったのは、その当時誕生したばかりの若い星や活発な銀河、そして大質量ブラックホールであったと考えられています。しかし一方で、そういった銀河や星の性質を観測的に制限することはこれまで困難でした。それはひとえに光源が我々から遠くに位置すること、そして発せられた光が取り巻く中性水素によって遮られてしまうためです。この問題を解決するために生まれたのが NASA・ESA 主導のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡です。中でも特筆すべきはその観測可能な波長域です。従来の望遠鏡に比較してより長い波長で宇宙を観測することができるため、取り巻く中性水素による減光を受けない光を用いて本来の銀河の姿を捉えることができるようになりました。

私はこの新しい望遠鏡によって取得されたデータをいち早く用い再電離期に存在する銀河の探査、調査をしました。天文学において最も重要なことは我々から天体への距離を正確に測定することです。遠方に存在する天体への距離を計測するには分光観測し、特徴的な輝線の位置を調べることが不可欠です。この新たに可能となった距離測定方法により、我々の研究チームは宇宙の特定の領域にある 7 つの銀河を分光観測しました。驚くことに我々が観測した銀河はどれも同じ距離に存在すること、つまり群れをなしていることが分かりました (図 1)。宇宙誕生からわずか 6 億年の間に、銀河形成が集団の中で行われていることの直接的な証拠です。測定された銀河質量、群れの大きさ、そして数値シミュレーションとの比較により、この銀河の群れはいずれ大きな系、およそこの宇宙で最も大きな質量を持つ銀河団へと成長していくという結論に至りました。

また、分光観測は銀河を構成する星やガスに含まれる元素の推定に重要な手がかりを与えてくれます。特に、水素や酸素原子に由来する特徴的な輝線のその強度や輝線幅を調べることにより、銀河がどのような進化の過程を経て形成されたのかを間接的に知ることができます。我々の見つけ出した銀河はどれも非常に若く、活発に星形成をしていることが分かりました。その強さは現在の宇宙で見られているものの約 10 倍から 100 倍にまで達し、宇宙初期の激しい星・銀河形成の様子を物語っています。そして何より銀河が宇宙再電離に貢献している証拠でもあります。我々の初期宇宙の銀河形成の研究はまだ序章です。この新しい望遠鏡からは日々興味深いデータが送り込まれており、我々は今後も宇宙への理解を着実に進めることができるでしょう。また、将来に向けての計画も着実に進められています。私自身、現在は 2026 年に打ち上げ予定のローマン宇宙望遠鏡という NASA 主導の新しい宇宙望遠鏡計画に携わっています。この新しい望遠鏡は、これまでにない視野の広さと高い観測感度を持ち、今回我々が発見した銀河の群れのような珍しい天体を多数発見してくれるでしょう。また、暗黒物質・暗黒エネルギーへの制限や宇宙の大規模構造に対する我々の理解を深めてくれると考えられています。

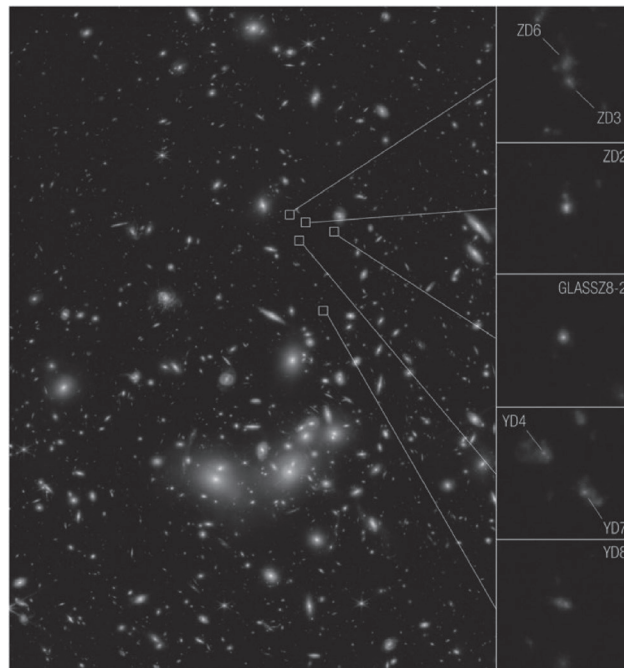


図 1. 分光観測によって距離が測定された 7 つの銀河。こういった銀河の群れが宇宙誕生から僅か 6 億年後（現在の年齢の 5% ほど）から存在していることが判明した。Credits: NASA, ESA, CSA, T. Morishita (IPAC). Image processing: A. Pagan (STScI)

サイエンスピックアップ

ブラックホールに毛はあるか

学際科学フロンティア研究所 助教 山田 将樹



ブラックホールは光さえも飛び出すことができないようなコンパクトな天体です。アインシュタインの一般相対性理論でその存在が予言されており、実際に銀河の中心部などにその存在が確認されています。近年では巨大ブラック

ホールの「影」の撮影に成功したことがニュースになるなど、世界中で精力的にブラックホールの研究が行われています。

普通の天体ですと表面や内部に複雑な構造を持っています。例えば地球の表面は山や谷がありますし、月はクレーターで凸凹しています。また、その化学的な組成も複雑です。このため、それらの天体の構造を完全に表すためのパラメーターは無数に必要になります。一方で、ブラックホールはその質量、角運動量、電荷の3つだけのパラメーターを指定すれば構造が完全に決まってしまうことが一般相対性理論で示されています。つまり、三つのパラメーターの値が全く同じブラックホールは、他に区別するための特徴がなく、ブラックホールがどのように形成されたかによらずに全く同一に見えてしまうということです。これを、ブラックホールに個性を与えるような「毛」が無いというイメージで、ブラックホールの無毛定理と呼びます。これがアインシュタインの一般相対性理論の帰結です。

しかし、一般相対性理論が教えてくれるのはブラックホールの表面と内部の構造だけですので、その周りに何が安定的に存在できるかというのはまた別の話になります。基本的には、ブラックホールは非常に強い重力場を持っていますので、その周りに何かがあってもすぐにブラックホールに引き寄せられて吸収されてしまいます。このため、通常はブラックホールの周りに何か安定な構造ができる可能性は考えにくいです。

しかし例えば、理論を拡張してヒッグス場のようなスカラー場を導入したときに、その場がブラックホールの周りに安定的に存在できるかどうかというのは少し非自明な問いになります。こういった可能性を調べることは純粋に理論的な興味になりますが、ブラックホールの無毛定理をブラックホールの周りの状況にも拡張できるかどうかという興味で研究されていました。特に、1996年にはMayoとBekensteinによって、角運動量を持たない（回転し

ていない球対称な）ブラックホールの周りには、安定的に存在できるスカラー場の配位は存在しない、という定理が証明されています。このことを、ブラックホールはスカラーヘアを持たない、と表現したりします。

私は、共同研究者と共に別の観点からブラックホールの周りのスカラー場の研究をしていました。まず、ブラックホールがなかった場合、スカラー場が集まろうとする自己相互作用と、それが持つ電荷による斥力が釣り合って、スカラー場だけで安定な構造を持つことができます。すると、その安定な構造の中に小さいブラックホールを置いたとしても、電荷による斥力とブラックホールによる引力がブラックホールの表面で釣り合っていれば、全体として安定な解が存在できそうだと予想できます。我々はその直感に基づいて、実際に安定な解を構成することに成功しました。その後で、我々の発見した解はMayoとBekensteinの定理と矛盾していることに気づきました。つまり、我々の計算が彼らの定理のどちらかが誤っていることになります。

結局我々はMayoとBekensteinの1996年の論文の論理の誤り（もしくは重大な近似の破綻）を発見し、それを修正するとブラックホールの周りにはスカラー場が安定に存在できる配位が存在することができ、実際にその解があることを示しました。二十年以上もの間に誤りが放置されていたことは驚きですが、どのような論文でも必ず自身で計算チェックを行うことが重要なだと再確認しました。また、厳密な計算に基づいた結果よりも直感に基づいた議論のほうが正しいことがあり、前者には簡単にはわかりづらいところで近似の破綻などがありうるのだ、ということは研究者として重要な教訓になりました。

得られた解が現実のブラックホールの周りで実現されているかということ、それはまずないだろうと考えています。しかし、ブラックホールは、重力理論と量子力学を融合した物理学の究極理論を探索する上で、有用な知見を与えてくれるような思考実験の場として最も重要なものの一つとなっています。ブラックホールやその周りの性質を探索することで、思ってもみなかった知見が将来得られるかもしれません。我々の研究成果も、量子重力理論から示唆される「予想」と関係しているようなパラメーター間の条件が現れました。それが偶然なのか、もしくはなにか深淵な意味があるのか、ということこれから明らかにしていく必要があります。

サイエンストピックス

海底観測データで解き明かす地震と津波と火山噴火のメカニズム

平成 23 年宇宙地球物理学科 (地物) 卒 防災科学技術研究所 主任研究員 久保田 達矢



2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震（以後、東北地震）は、巨大な津波が沿岸地域に甚大な被害をもたらしました。地震学という学問は、地震の発生機構を解き明かすといった純粋な自然科学という側面に加え、災害の軽減に資するというやや特殊な側面

も持っています。

東北地震のような、陸から遠く離れた沖合で発生する地震の発生過程を詳細に知るには、遠く離れた陸ではなく、震源の直上に設置された海底の観測機器のデータが有効です。東北地震では、海底観測データの解析から、沈み込むプレートの境界の浅部で最大 50 m を超える巨大な断層すべりが生じたことが明らかとなりました。近年では、日本周辺の沖合の海底に地震と津波の観測網が展開されるようになっていきます。わたしは、これまで、このような、沖合の海底で得られた「その場観測データ」を駆使して、地震・津波・火山現象の物理メカニズムの理解に向けた研究を進めてきています。

海底の地震や津波の観測機器には、地震計をはじめ、さまざまなものがありますが、「海底圧力計」は非常に有用な観測機器のひとつです。海底圧力計は、津波による海面波高の変化を、海底における微小な水圧変化として記録します。プレート境界での断層すべりのうち、海底に近い浅部で生じるすべりは、深部で生じるすべりよりも海底を変形させ、効率的に津波を引き起こします。言い換えると、津波の観測データは、浅部の断層すべりの情報を豊富に含みます。わたしは、東北地震の震源域直上に設置された海底圧力計の津波波形データを解析し、プレート境界の断層すべりの様子を従来よりも高い精度で推

定しました（図 1 左）。さらに、東北地震のプレート間すべりの原動力である「応力」の解消の様子を推定し、浅部の大すべりは、応力を解消せずに生じたことを明らかにしました（図 1 右）。これは、東北地震および浅部すべりを引き起こす原動力となったエネルギーが、プレート境界の浅部ではなく、むしろ力学的に強く固着していた深部側に蓄積されていたことを示唆します。

また、2022 年 1 月 15 日には、南太平洋トンガ諸島のフンガ・トンガ・フンガ・ハアパイ火山で大規模な噴火が発生し、日本を含む世界各地で津波が観測されました。この津波は、理論的に予想される津波の伝播速度（およそ 200–250 m/s）よりも速く（約 300 m/s）津波が到達したという特徴がありました。この噴火が発生した際、世界各地の気圧計が、約 300 m/s で伝播する気圧変化の波を記録していました。これは、地球表面に沿って伝播する「大気音響重力波」の一種である「大気ラム波」と呼ばれる波です。わたしは、数値シミュレーションを用いて、大気ラム波によって津波がどのように生じるかを計算しました（図 2 上）。その結果、世界各地の津波観測データの第一波部分をよく再現しました。この結果は、この異常に速く伝わった津波が、大気ラム波によって励起された津波であることを意味します。さらに、その結果をもとに、今般の津波の発生メカニズムを世界に先駆けて明らかにしました（図 2 下）。

最後になりますが、この度の第 15 回泉萩会奨励賞を受賞にあたり、選考に携わられた先生方、海底の観測データの取得にご尽力されてきた皆さま、これまでご指導いただいた先生方、共同研究者の皆様に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

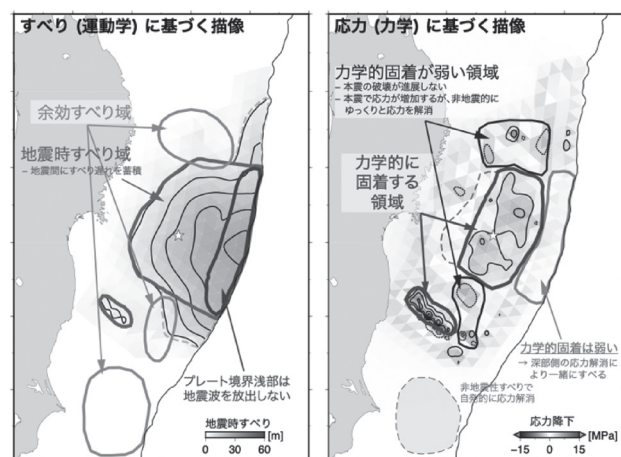


図 1. 2011 年東北地震の（左）プレートすべりの様子と（右）応力の解消分布とすべりの力学的発生機構。

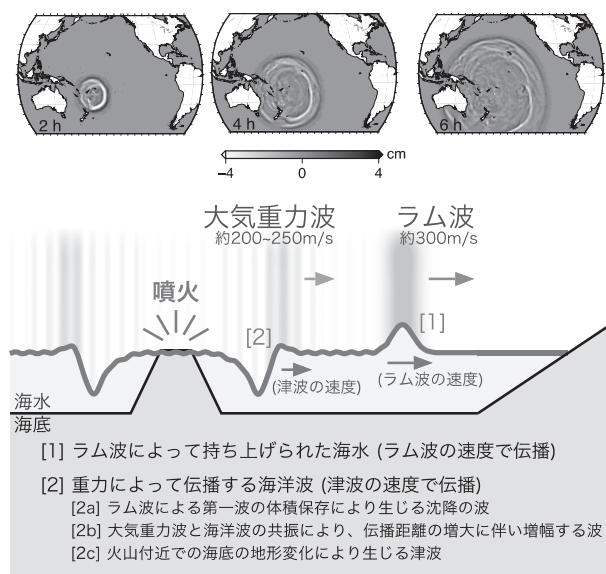


図 2. (上) 2022 年トンガ噴火の津波の伝播シミュレーション。(下) 津波の発生のメカニズム。

サイエンスピックアップ

令和 6 年能登半島地震について

昭和 56 年 天文及び地球物理学科第二(地球物理) 卒 地震・噴火予知研究観測センター 教授 松澤 暢



2024 年(令和 6 年)1 月 1 日 16 時 10 分に石川県能登地方の深さ約 15 km で M7.6(気象庁マグニチュード)の地震が発生しました。これにより、死者 245 名、負傷者 1,300 名の人的被害があり、8,695 棟の全壊を含め、113,990 棟もの住家被害が生じました(2024 年 4 月 2 日 14 時現在;消防庁情報による)。この地震により亡くなられた方々に深く哀悼の意を表するとともに、被害にあわれた方々に心よりお見舞い申し上げます。

能登半島周辺では、1993 年 2 月 7 日に M6.6 の地震が半島の北東沖で発生し、また、2007 年 3 月 25 日に M6.9 の平成 19 年(2007 年)能登半島地震が半島の西岸で発生するなど、近年、大きめの地震が続いていました。今回の M7.6 の地震の震源(断層破壊の開始点)が位置する能登半島東端付近では、2020 年 12 月頃から活動が活発化し、また、震源の位置が次第に浅くなっていくという傾向が認められていました。また、2021 年 9 月 16 日に M5.1、2022 年 6 月 19 日に M5.4、2023 年 5 月 5 日に M6.5 の地震が発生するなど、次第に規模が大きくなってきており、さらに大きな地震の発生が危惧されていた場所でした。

海底の探査により、能登半島の北東沖から北岸に沿って活断層が存在していることが知られており、国土交通省に設置された「日本海における大規模地震に関する調査検討会」が 2014 年に公表した報告書では、この活断層が動いた場合、モーメントマグニチュード(M_w) 7.6 の地震となると推定されていました。今回の地震の M_w は様々な機関で推定されており、いずれも $M_w 7.5 \pm 0.1$ 程度の値が報告されていますので、ほぼ予想されていた通りの場所と規模で地震が発生したことになります。

今回の地震で能登半島の北岸が大きく隆起したことが報告されていますが、過去にも同じような隆起が生じていたことが、海岸段丘の調査で知られており、この付近では数百年から 2 千年程度に一度、大地震が生じていたと、今回の地震の前に推定されていました。一方、今回の隆起量が最大約 4 m と極めて大きかったことから、今回の地震は過去 6 千年で最大の地震であった可能性が指摘されています。

今回の地震を生じさせたと考えられる活断層のすぐ東に、 $M_w 7.3$ の地震を起こしてもおかしくない活断層が存在していることが上記の調査検討会の報告書で示されています。詳細な余震分布や津波の解析から、この東側の活断層は、今回の地震でその深部

が破壊した可能性があるものの、浅部はほとんど動いていないと考えられるため、今後、この東側の活断層が滑って M7 級の最大余震を生じさせることが心配されています。

前述のとおり、能登半島の北東部では、2020 年 12 月頃から地震活動が活発化し、地震活動が次第に浅くなってきていました。また、これらの震源分布のすぐ下には地震波を反射させる面が存在していることが明らかになり、さらにそれよりも深部では電気比抵抗が小さく、S 波速度が小さいことから、深部から水が上昇してきて、それが地震活動を活発化させた可能性が高いと考えられています。前述の能登半島北岸に存在する活断層は、南に傾き下がる逆断層であるため、その深部延長は半島の陸地の下に存在することになりますので、上記の水が上昇してきて活断層深部まで達して、そこで断層を滑りやすくしたことが、今回の大地震の発生に繋がった可能性が高いと考えられます。

1965 年から始まった松代群発地震等、火山近傍以外で生じる群発地震については、このような水の上昇が発生原因であるとの説が有力でした。今回の地震は、このような水の上昇が群発地震のみならず M7.6 の大地震をも引き起こしうることを示しており、今後、水と地震との関係をさらに明らかにする研究の進展が重要となっています。

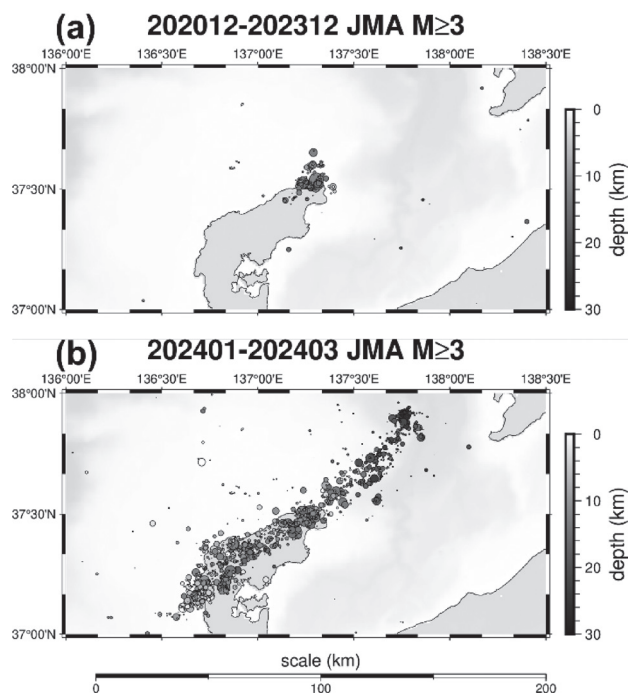


図 1. 能登半島周辺の M3 以上の地震の震源分布。(a) 2020 年 12 月～2023 年 12 月。(b) 2024 年 1 月～3 月。長さ約 150 km もの断層が破壊したことがわかる。