

# アルマ望遠鏡が明らかにしたSSA22領域における銀河形成の新描像



梅畑 豪 紀<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学 〒464-8602 愛知県名古屋市千種区不老町

<sup>2</sup>California Institute of Technology, MS 249-17, Pasadena, CA 91125, USA

e-mail: <sup>1</sup>umehata@phys.nagoya-u.ac.jp

SSA22領域は赤方偏移3.1の時代に顕著な原始銀河団を持つことが知られています。およそ30 Mpcに及ぶ三次元の宇宙大規模構造が発見されており、原始銀河団、宇宙大規模構造の中でどのように銀河が形成・進化してきたのかを調べる上で最適な対象の一つとなっています。本稿ではアルマ望遠鏡によるミリ波サブミリ波探査の視点を中心に、SSA22領域でこれまでに明らかになってきた初期宇宙における銀河形成・進化の様子を見ていきます。最初のアルマ深宇宙探査領域の一つであるADF22の開拓と爆発的星形成銀河形成の強い環境依存性の発見、水素ライマン $\alpha$ 線との協奏による宇宙網の撮像成功と大質量銀河形成への宇宙網の寄与、冷たい星間物質の観測から拓かれたライマン $\alpha$ プロップの新たな側面、そしてハッブル宇宙望遠鏡では捉えられない大質量銀河種族の分子ガス検出と進化史についてご紹介します。

## 1. 宇宙大規模構造と銀河形成

宇宙開闢から現在に至るまでの宇宙の歴史を紐解くうえで、その基本となる枠組みとして標準宇宙モデルが提唱されています。この考え方によれば、暗黒物質が質量の大部分を占め、その重力進化の結果として生み出された宇宙大規模構造の内部で大質量の銀河が生じ、その銀河が星形成活動を繰り返しながら進化するとともに、銀河中心に潜む大質量ブラックホールにガスを供給し成長させる階層的な天体形成の描像が間接的に支持されています。銀河形成は宇宙大規模構造の形成・進化と不可分なものであり、したがって銀河の性質や進化を存在する環境と結びつけて理解することは根源的な重要性を持つといえます。遠方宇宙において銀河が急速な成長を遂げている段階では物質進化の過程で生み出された多量のダスト（塵）

によって星からの紫外線放射が吸収、再放射されることも想定され、他の様々な波長による観測とともにアルマ望遠鏡による星間物質の探査が重要な意味を持つこととなります。

## 2. アルマ深宇宙探査領域の開拓

### 2.1 SSA22原始銀河団

このような背景のもと、遠方の初期宇宙における銀河の密度超過領域、すなわち原始銀河団は興味深い研究対象として様々な角度から調べられてきました。ミリ波サブミリ波においてもアルマ望遠鏡の稼働までに単一鏡や他の干渉計による観測の対象となってきていました。アルマ望遠鏡の最初の観測公募（サイクル0）が開始された2011年の時点では、しかしながら遠方の原始銀河団の探査は現在と比べると遥かに途上であり、既知の原始銀河団の数も限られたものでした。その中で

我々のグループは赤方偏移3.1のSSA22原始銀河団領域に着目し、サイクル0から観測提案を続けてきました。この原始銀河団にはいくつかの際立った特徴があります。まず経緯として、電波銀河のような特定の（大質量の、したがって密度超過領域の目印として使用される）銀河種族がまず発見されその周囲に見つかったような例ではなく、様々な天域を開拓していく中で、紫外線連続光で選択される銀河（ライマンブレイク銀河）の密度超過として発見されました [1]。したがって原始銀河団としての進化段階、選択効果へのバイアスは比較的lowく、一般的な描像を得やすい対象だと考えられます。また、（当時としては非常に広い視野を持っていた）すばる望遠鏡のSuprime-Camを用いた狭帯域フィルターを使った撮像観測、そしてFOCASによる可視光分光観測によって水素ライマン $\alpha$ 輝線銀河の二次元 [2]、さらには三次元 [3] の空間分布が求められており、30 Mpcに及ぶフィラメント状の大規模構造が発見されていました。これらの経緯や特徴は、初期宇宙の宇宙大規模構造の中でどのように銀河が形成・進化してきたのかを探るうえでSSA22原始銀河団が非常に適した対象であることを意味しています。

さらに、アルマ望遠鏡が動き出す前に、様々な波長による観測、研究が盛んに行われていたことも重要な要素でした。チャンドラX線宇宙望遠鏡によって活動銀河核探査が行われており、これは遠方の原始銀河団の中では最も高い感度を誇るものの一つでした [4]。またすばる望遠鏡のMOIRCSによる深い近赤外線撮像 [5] などが行われ、多波長データが豊富な天域の一つになっていました。ミリ波・サブミリ波においてもASTE望遠鏡にAzTECカメラを搭載して行われた波長1 mmの広視野観測によって125個のサブミリ波天体が発見され [6]、ライマン $\alpha$ 輝線銀河の分布とこれらのサブミリ波天体の分布の相関が発見される [7] など、原始銀河団の内部でダストに隠さ

れた星形成活動が活発に行われていることを示唆する状況にありました（本稿ではASTE望遠鏡などの単一鏡で観測、検出された天体はサブミリ波銀河ではなく「サブミリ波天体」と呼ぶことにします。これは後述の通り角分解能の限界のため一つの銀河からの放射を検出しているとは限らないという事情によります）。

## 2.2 ADF22プロジェクト

SSA22原始銀河団を対象としたアルマ望遠鏡のプロジェクトの中で、最も重要なものの一つがSSA22アルマ深宇宙探査領域（ALMA Deep Field in SSA22, 以降ADF22）の開拓です。ライマン $\alpha$ 輝線銀河の分布から導かれた三次元の大規模なフィラメント構造の中心付近で結節点にあたる領域に対して2分角 $\times$ 3分角の波長1 mmの画像を得るといこのプロジェクトはアルマ望遠鏡のサイクル2に開始されました。この6平方分角という観測領域の広さは、可視光や近赤外線だと比較的容易に達成されうるものですが、波長1 mm付近での単一の視野が直径20数秒しかないアルマ望遠鏡にとっては非常に広い範囲です。このプロジェクトでは100個以上の視野をモザイク状に繋ぎ合わせるという手法をいち早く取り入れ、この超広視野観測を達成しました [8]（後続のサイクルで探査領域は20平方分角まで拡大されています [9]）。

なぜこのような簡単ではない観測をしてまでADF22を開拓する必要があったのか、それはアルマ望遠鏡が産声を上げる前の画像とアルマ望遠鏡によって得られた画像を比較すると明らかになります。図1はADF22領域のASTE望遠鏡とアルマ望遠鏡による1 mm画像を示しています。左のASTE望遠鏡とAzTECカメラによって得られた画像 [6] は広い視野に強みがある一方で、30秒という角度分解能は物足りないものでした。右のアルマ望遠鏡による画像はサイクル5で撮り足されたデータを含めた現時点で最も深いこの領域の画像 [8] です。その差は一目瞭然であり、ASTE

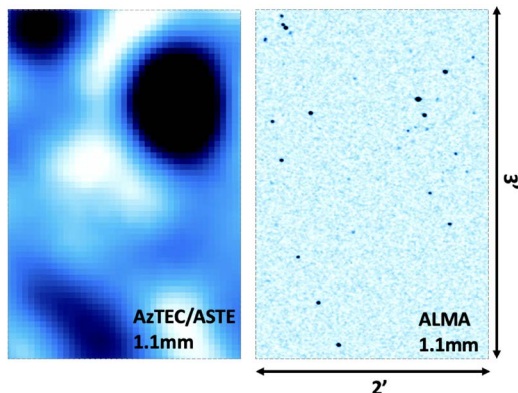


図1 ADF22領域の波長1 mm画像. 左はASTE望遠鏡に搭載されたAzTECカメラによるもの [6], 右はアルマ望遠鏡によるもの [8]. 角分解能, 感度がそれぞれ約30倍向上した.

望遠鏡の画像では難しかった個々の銀河の同定やより暗い天体の検出がアルマ望遠鏡の観測によってはじめて可能になっていることがわかります.

サイクル2というアルマ望遠鏡草創期に始まったADF22プロジェクトは最初のアルマ深宇宙探査領域の一つであり, かつ原始銀河団に着目したという点が他のプロジェクトと一線を画す独自性になっています. このADF22の開拓も呼水となり, SSA22原始銀河団では現在までに数多くのアルマ望遠鏡による観測が行われ, また様々な切り口から研究が行われてきました. 次節ではその中から4つ, 代表的なものをご紹介します.

### 3. アルマ望遠鏡が開拓したSSA22原始銀河団の新描像

#### 3.1 爆発的星形成と超大質量ブラックホール成長の同期的加速

サブミリ波でダストの熱放射が明るく観測され, 爆発的な星形成活動をしていると考えられる銀河(サブミリ波銀河, または爆発的星形成銀河)の研究をまず律速してしまう問題が, (1) 対応天体の同定と(2) 分光赤方偏移の決定です. (1) については上述の通り単一鏡望遠鏡観測における角分解能の問題が大きく, (2) について

はダスト減光が顕著であり, 紫外線で選択される銀河に対して有効な静止系紫外線や可視光の輝線の検出が容易ではないことが主な要因となります. サイクル2の観測では, ADF22領域において18個のサブミリ波銀河が波長1 mmの観測から発見・同定されました. 1秒角を上回る分解能, モザイク観測による視野全面マッピングの成果として, ULIRGクラス(全赤外線光度が $10^{12}$ 太陽光度以上)のサブミリ波銀河をもれなく検出することができ, (1) についてはまず解決することができました. 次に, 分光赤方偏移についてはライマン $\alpha$ (静止系紫外線) [11] から電離酸素輝線([OIII])(同可視光) [12], 一酸化炭素(ミリ波) [8] など様々な輝線を用いた測定結果を糾合し, 最大限の分光赤方偏移カタログを作成しました.

これらの結果, ADF22として設定されたこの宇宙大規模構造の結節点, 原始銀河団中心部が特別な領域であることが明らかになりました. まず, 同等の赤外線光度で比較した際, サブミリ波銀河は一般領域と比して数百倍から数千倍の密度超過を示すことがわかりました. また, チャンドラ宇宙望遠鏡のデータから, 同等のX線光度で比較するとX線で明るく輝く活動銀河核も同様の密度超過を持つことが示されました. さらに, 6個の銀河はアルマ望遠鏡でもチャンドラX線衛星でも検出が確認され, ダストに隠された爆発的星形成活動と大質量ブラックホールへの活発な質量降着が一つの銀河の中で同居していることが明らかになりました. これらの結果から, 大質量の活動銀河の形成と進化について, 原始銀河団の中心という環境が重要な要素となっていることがそれまででない形ではっきりと示されました [8].

#### 3.2 宇宙網に沿った大質量銀河および大質量ブラックホールの形成

ADF22領域のサブミリ波銀河やX線で選択された活動銀河核の顕著な密度超過は, どのような機構によってもたらされたのでしょうか.



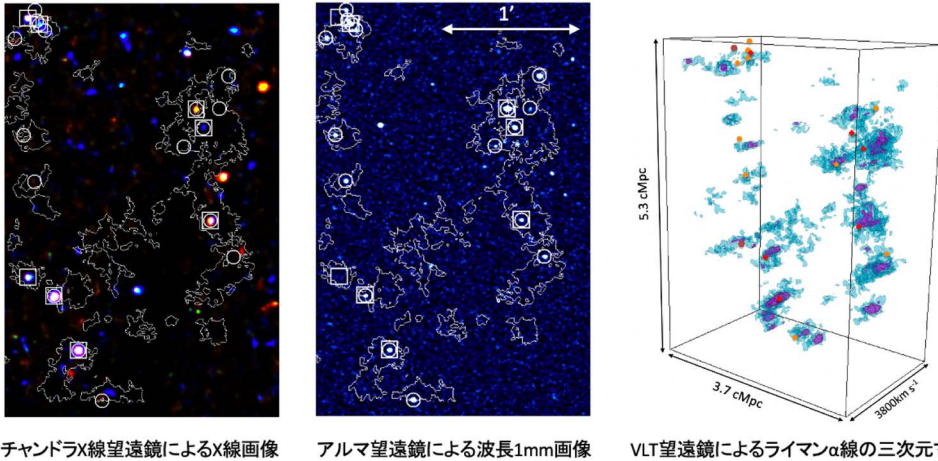


図2 左図および中図はそれぞれチャンドラ宇宙望遠鏡によるX線、アルマ望遠鏡によるサブミリ波で観測されたADF22領域の画像。分光赤方偏移が3.1と特定されたものについて爆発的星形成銀河を円で、X線で同定された活動銀河核を四角で示している。コントラで示された宇宙網のライマン $\alpha$ フィラメントはこれらの大質量活動銀河を架橋し長大な広がりを見せている。右図はVLT望遠鏡の面分光装置MUSEによって得られたライマン $\alpha$ フィラメントの三次元マップ。宇宙網と大質量銀河は三次元的にも付随していることが見出された [10].

ADF22の開拓によって生じたこの疑問に相対する中でまた新たな発見がありました。前述の通り、SSA22原始銀河団ではそれまでにライマン $\alpha$ 線を捉えるための狭帯域撮像観測が行われていました [13]。その中で、ライマン $\alpha$ 輝線銀河やライマンブレイク銀河だけでなく、ライマン $\alpha$ プロップと呼ばれる、ライマン $\alpha$ 輝線が広がったガス状天体の存在が明らかになっていました [13, 14]。ADF22領域で過去に取得されていたSuprime-Camの狭帯域画像を見直してみたところ、これまでライマン $\alpha$ プロップとして知られていたものよりもさらに淡く広がったライマン $\alpha$ 放射が存在し、さらにアルマ望遠鏡によって発見されたサブミリ波銀河と同居、あるいは繋いでいるような兆候が見つかりました。

このような構造や空間分布の相関はそれまでまったく知られていなかったものであり、兆候に気づいた際の興奮は相当なものでした。しかしその信号雑音比は低く、確実に検出できたと主張できるかどうかは微妙なところでした。そこで我々はESOの持つVLT望遠鏡に搭載された可視光面

分光装置MUSEによる追観測を実施することにしました。MUSEは1分角 $\times$ 1分角の視野に対して全てのピクセルに対してスペクトルを得られる、非常に強力な観測装置です。合計6視野をモザイク観測することでADF22のほぼ全面にわたってライマン $\alpha$ を含む(観測波長で)可視光のスペクトルを得ることができ、Suprime-Camで見つかった淡いライマン $\alpha$ 放射の検出を確認するだけでなくその三次元構造を詳らかにすることに成功しました [10]。

図2に示すように、観測されたライマン $\alpha$ 線の淡い放射はMpcスケールの大規模なフィラメント状のネットワークを構成しています。このようなバリオンの構造は「宇宙網」と呼ばれ、理論やシミュレーションの面からその存在が予期されつつも観測には至っていなかったものでした。そして、赤方偏移3.1の原始銀河団メンバーのサブミリ波銀河やX線で明るい活動銀河核は全て、一つの例外もなく二次元だけでなく三次元的にもこの宇宙網のフィラメントに沿って分布していることが明らかになりました。この成果は、宇宙網が成

長の源となるガスを供給することでサブミリ波銀河として観測される急速な成長過程にある大質量銀河やX線で明るく輝く大質量ブラックホールを持つ活動銀河核が急速な成長を見せていることを示唆するものです [10].

### 3.3 ライマン $\alpha$ ブロッブとダスティな銀河の普遍的共存と広がった星間物質の検出

ADF22の観測結果から、ライマン $\alpha$ ブロッブはADF22の中にも2つカタログされており [13], どちらも共通して (i) 宇宙網の一部を成しており, (ii) アルマ望遠鏡で発見されたダストに隠された爆発的星形成銀河が付随している, ことがわかりました [8]. まず, 前者の宇宙網との包含関係は両者の一般的な関係を示している可能性があります. すなわち, これまでライマン $\alpha$ ブロッブとして見つかった部分はより広範な宇宙網の明るい部分, いわば氷山の一角である可能性が提起されました. そして後者のサブミリ波銀河が普遍的に付随しているという事実は, 宇宙網の中で一部がライマン $\alpha$ ブロッブとして輝く背景にダストを豊富に含む星形成銀河が関係しているということを示唆しています.

このライマン $\alpha$ ブロッブとダストに隠された星形成銀河の関係を調べるうえで, 最適な対象の一つが最も明るく, そして最初に発見されたライマン $\alpha$ ブロッブでもあるSSA22-LAB1になります. 図3に示すように特に明るくそして広がったライマン $\alpha$ 放射を持ち, 多くの後続の探査が進む今も尚, 最も顕著なライマン $\alpha$ ブロッブとして知られています. 図3に同じく示したものはアルマ望遠鏡によって得られたダスト連続光および炭素電離輝線 ([CII]) の画像です [15, 16]. これらの冷たい星間物質で見てきた世界は可視光で見ていたものとは大きくかけ離れたものでした (図3). 少なくとも5個の銀河がダスト連続光および[CII]で検出され, LAB1は形成期の銀河の多重合体の場であること, 銀河のまわりに広がったダストやガスといった星間物質の放射が存在していること

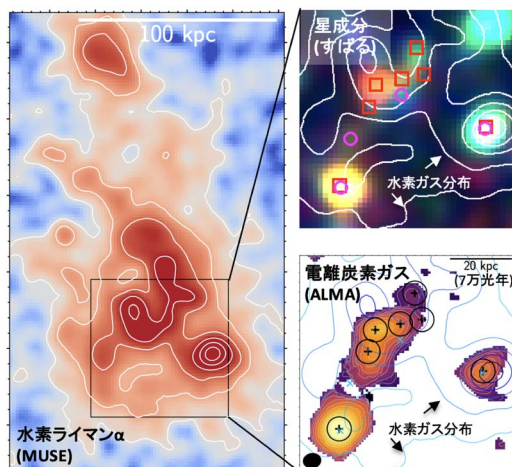


図3 左図はVLT望遠鏡に搭載されたMUSEによって得られたLAB1のライマン $\alpha$ 画像. 右上図, 右下図はその中心部に対して得られたすばる望遠鏡による可視光画像, 電離炭素ガスの強度分布を示す [15].

が明らかになりました.

なぜLAB1ではここまで広がった顕著なライマン $\alpha$ 放射が存在しているのかは大きな論争の的になってきました. 最近のライマン $\alpha$ 面分光観測の結果からは, より赤い側が卓越したスペクトルプロファイルの普遍的な存在などから, 中心の熱源から放出されたライマン $\alpha$ 光子が周囲の中性水素によって散乱されているのではないかという説が一つ有力になりつつあります [17]. 今回, 共鳴散乱する特性から単独では赤方偏移の決定が困難であるライマン $\alpha$ のスペクトルに対して [CII] の検出によって広い範囲で正確な分光赤方偏移を決定することができ, この「中心の熱源とその後の散乱」というシナリオを一つ新しい形で補強する結果となりました. 一方で中心の銀河の星形成率は数百 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ と特別大きなものではなく, 何か他にLAB1を特別な存在にしている要素の存在も強く示唆されます. これまでにシミュレーションからは銀河合体に伴う重力相互作用によって引き起こされる冷却放射がライマン $\alpha$ ブロッブの源の一つであることが示唆されています [18]. 新たに

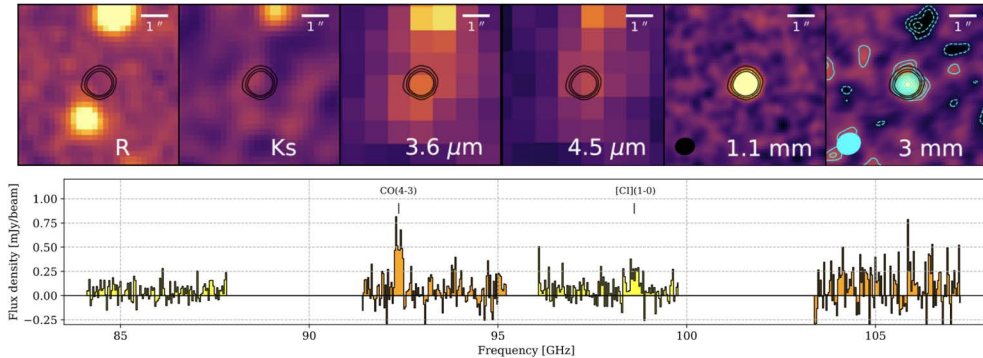


図4 上図はADF22.A2の多波長画像を示す。可視光(すばる望遠鏡Rバンド)や近赤外線(すばる望遠鏡Ksバンド)では対応天体が確認できない一方でスピッツァー宇宙望遠鏡による中間赤外線(3.6ミクロン, 4.5ミクロン)やアルマ望遠鏡でのミリ波(1ミリ, 3ミリ)といったより長い波長では明るく観測されていることがわかる。下図はアルマ望遠鏡によって得られたADF22.A2のミリ波スペクトル。横軸は観測された周波数, 縦軸はフラックス密度を示す。2本の分子ガスからの輝線の検出によって分光赤方偏移が3.991と求められた [19]。

LAB1で見つかった星間物質の豊富な銀河の多重合体は、このようなシナリオについても見直す必要性を示しました [15]。

### 3.4 可視光や赤外線で暗い銀河種族の発見

ADF22は赤方偏移3.1を主たる対象とした観測プログラムである一方で、その深いアルマ望遠鏡の観測、ならびに他の多波長データは他の赤方偏移の探査においても非常に有用なものとなります。その例の一つがADF22領域でも特に明るいサブミリ波銀河の一つであるADF22.A2です。この天体は唯一赤方偏移3.1のライマン $\alpha$ 放射に付随していません。アルマ望遠鏡の観測によって、この天体は赤方偏移3.1ではなくより遠方に位置していること、最近(再度の)脚光を浴びつつある「ハッブル望遠鏡でも見えない銀河」の好例でもあることが明らかになりました。

図4は様々な波長におけるADF22.A2の見え方を示したものです。スピッツァー宇宙望遠鏡で観測された中間赤外線の画像、アルマ望遠鏡のミリ波での画像では明るく見えている一方で、可視光から近赤外線の観測では対応天体が見えていないことがわかります。このような、ハッブル望遠鏡で最も長い波長域であるHバンド、あるいはさらに長い地上からの一般的な限界であるKバンド

でも非常に暗い、あるいは全く見えていない銀河種族の存在は以前から知られていました(たとえば [20])が、ここ数年徐々に注目を浴びるようになってきました [21]。この銀河種族の主要な構成要素の一つはサブミリ波で明るいダストを大量に含んだ大質量銀河だと考えられます。ADF22.A2はまさにその例を体現していることがわかります。

このような近赤外線でも暗い銀河種族を調べるうえで課題となるのが、やはり分光赤方偏移の決定であり、候補として発見されても分光赤方偏移が決まっていない例が大半を占めるのが現状です。我々はアルマ望遠鏡を使って分子ガスの輝線を事前に赤方偏移した周波数がわからない中、周波数方向にスキャンすることで(無バイアスに)探査し、2本の異なる輝線を検出することでADF22.A2の赤方偏移が $z=3.991$ であることを突き止めました。さらに星質量、ガス質量、星形成率を導出しこの銀河が赤方偏移3に至るまでに星形成活動を終え受動的な銀河に進化している可能性が高いことを見出しました [19]。ここで扱ってきたような近赤外線でも暗い銀河種族は主に赤方偏移4付近に存在するのではと考えられていましたが決定的な証拠には乏しい状況でした [21]。



ADF22.A2の結果は分光赤方偏移を突き止め、基本的な性質や進化経路をいち早く見出すことができたことを意味します。

#### 4. 将来展望

ADF22, そしてSSA22領域のアルマ望遠鏡を用いた探査は最新のサイクル10まで採択と実行が続いており、今後も様々な進展が期待されています。ダスト連続光は0.03秒角(約230 pc)という高い角分解能が達成されており、中心のスターバースト領域や個々のクランプが分解されつつあります。[CII]による銀河内部を分解して星間物質の運動状態や物理化学状態を明らかにするプロジェクトも始まっています。探査はアルマ望遠鏡だけに止まりません。現在、すばる望遠鏡インテンシブプロジェクトとしてSSA22原始銀河団のライマン $\alpha$ 線の超広域狭帯域撮像探査が進められています。2023年10月からはジェームズウェッブ宇宙望遠鏡を用いたADF22領域の撮像分光探査もついに始まりました。今後も遠方宇宙の重要な窓の一つとして、様々な観測的研究が展開されていくと期待されています。

#### 謝辞

本稿で紹介させていただいた一連の研究は河野孝太郎氏、田村陽一氏、中西康一郎氏、松田有一氏、久保真理子氏をはじめとする共同研究者の方々とともに進めてきたものです。この場を借りて感謝の意を記したいと思います。また、本稿執筆の機会をいただいた廿日出洋氏、本稿をご担当いただいた天文月報編集委員の橋本拓也氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] Steidel, C. C., et al., 1998, ApJ, 492, 428
- [2] Hayashino, T., et al., 2004, AJ, 128, 2073
- [3] Matsuda, Y., et al., 2005, ApJ, 634, L125
- [4] Lehmer, B. D., et al., 2009, ApJ, 691, 687
- [5] Uchimoto, Y. K., et al., 2008, PASJ, 60, 683
- [6] Umehata, H., et al., 2014, MNRAS, 440, 3462
- [7] Tamura, Y., et al., 2009, Nature, 459, 61
- [8] Umehata, H., et al., 2015, ApJ, 815, L8
- [9] Umehata, H., et al., 2017, ApJ, 835, 98
- [10] Umehata, H., et al., 2019, Science, 366, 97
- [11] Saez, C., et al., 2015, MNRAS, 450, 2615
- [12] Kubo, M., et al., 2015, ApJ, 799, 38
- [13] Matsuda, Y., et al., 2004, AJ, 128, 569
- [14] Steidel, C. C., et al., 2000, ApJ, 532, 170
- [15] Umehata, H., et al., 2021, ApJ, 918, 69
- [16] Umehata, H., et al., 2017, ApJ, 834, L16
- [17] Li, Z., et al., 2021, MNRAS, 502, 2389
- [18] Yajima, H., et al., 2013, ApJ, 773, 151
- [19] Umehata, H., et al., 2020, A&A, 640, L8
- [20] Wang, W.-H., et al., 2009, ApJ, 690, 319
- [21] Wang, T., et al., 2019, Nature, 572, 211

### The New Depiction of Galaxy Formation in the SSA22 Field Revealed by ALMA

Hideki UMEHATA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Nagoya University, Furocho, Chikusa, Nagoya

464-8602, Japan, <sup>2</sup>California Institute of

Technology, MS 249-17, Pasadena, CA 91125, USA

Abstract: The SSA22 field has been known to harbor a remarkable proto-cluster at  $z=3.1$ , which offers a unique laboratory to investigate galaxy formation and evolution within a cosmic large-scale structure in the early universe. Here we introduce some recent results in SSA22 mainly focusing on outcomes achieved by ALMA observations, including the ALMA deep field in SSA22 (ADF22) projects and the discovery of the cosmic web filaments.