

# 究極の宇宙サーベイ

谷口 義明

〈放送大学学園 〒261-8586 千葉県美浜区若葉 2-11〉

e-mail: yoshiaki-taniguchi@ouj.ac.jp



物理学が成熟したかのような20世紀を終えたが、天文学は今まだ怒涛の進展を見せている。その一方で閉塞感が感じられる時代に入りつつあることを、多くの研究者が認識し始めていることも事実だ。たとえば、宇宙論は哲学の時代を終え、明らかに精密科学の時代に突入した。バリオン、ダークマター、ダークエネルギーの組成比や宇宙年齢。20世紀に私たちが知りたかったことは、1%以下の誤差精度で、もうわかってしまった。これ以上何を知りたいのか？ この問いかけが切実なものになってきたのだ。しかし、ある意味で、人類のおごりかもしれない。まだ見えていない宇宙が厳然としてあるからだ。人類は宇宙をどこまで見通し、完全な理解への道を歩もうとしているのだろうか？ 現時点で、私たちの宇宙探求のゴールははまだ見えていないが、いつまでも、そう言っているわけにもいかない。本稿では“究極の宇宙観測とは何か？”という問いかけに真正面から取り組んでみたい。

## 1. これ以上何を知りたいのか？

2017年3月11日と12日、東京大学理学部4号館のセミナー室で重要な研究会が開催された。その研究会の名称は

学術会議シンポジウム

「天文学・宇宙物理学のさらなる地平を探る」

であった。開催趣旨は以下のように案内されていた。

“巨大化が進む天文学・宇宙物理学の最先端が今から数十年先に進むべき方向性を議論し、将来の日本の研究のあり方を考える機会を提供する”

どう考えても重要な研究会であり、出席するに限る。プログラムを見てみると初日に二つの興味深

い講演が用意されていた。

須藤靖（東京大学）

「これ以上何を知りたいのか？」

山田亨（宇宙科学研究所）

「これ以上何を知りたいのか？ II（大型プロジェクトの未来）」

なんとも、刺激的なタイトルの講演が続く。だが、講演の趣旨は薄々理解できるような気がした。振り返って見れば、20世紀後半から天文学は飛躍的な進歩を遂げてきた。しかし、2017年の今、誰も思うことがある。あまりにも多くのことがわかってしまった。このままだと、天文学の将来に何が待っているのだろうか？ そういう疑問だ。

私が大学院に入って天文学の研究を始めた頃（1980年代）、宇宙の年齢はわかっていなかった。まだ、100億年から200億年の間で揺れていた時

代だ。暗黒物質の存在はささやかれ始めていたものの、暗黒エネルギーについて語られることはほとんどなかった\*1。しかし、今や、宇宙年齢をはじめとする宇宙論的なパラメーターは非常に良い精度でわかってしまったのだ。一方、素粒子物理学の世界でもヒッグス粒子が発見され、一区切りついた。また、なかなか検出されなかった重力波までもついに検出されてしまった。まさに、研究会の冒頭で須藤氏と山田氏が問いかけを寄せられたように

「これ以上何を知りたいのか？」

という問題に私たちは直面しつつあるのだ。

天文学や物理学の実験は、年々巨大化し、100億円のオーダーで実現できる計画が少なくなってきた。人類全体のGDPを考えると、将来的に超巨大科学を健全に推進していくことが難しい時代に入りつつあるのは明らかだ。

「私たちはどこに向かうのか？」

今の時代、私たちは真剣にこの問題に立ち向かう必要に迫られているのだ。

研究会ではターゲットを2050年に設定し、私たちの向かう方向性が活発に議論され、たいへん有意義だった。特に、若手からの熱意ある提案もあり、研究会は多いに盛り上がった。その一方で、私はふと思った。宇宙を探求するという観点から、究極の観測があるとすれば、それは何なのだろうか？ 現実的な路線を意識しすぎていて、

本気で究極の観測について考えてこなかったのではないだろうか？ そんな疑問が頭の中をぐるぐると回り出してしまったのだ。それなら、考えてみるしかない。そこで、本稿ではこの究極の宇宙観測について考えてみることにした。力及ばずとしても、まずは考えてみる。そこから始めるしかないからだ。

## 2. 宇宙の観測

とりあえず、天文学の歴史をひも解いてみよう。宇宙の理解に対する経緯を簡単にまとめると以下ようになる。

[1] 宇宙を観る

[2] 面白い現象を調べる

たったこれだけだ。

### サーベイ

[1] については、言葉を換えて言うところ“サーベイ”のことである。最初は肉眼で宇宙を眺めることだったが、そのうち望遠鏡が発明されると望遠鏡で宇宙を眺める時代に入った。ガリレオ・ガリレイが口径4 cmの屈折望遠鏡で宇宙を眺めたのが1609年のことだった。そして、写真技術が開発されると、望遠鏡にカメラを取り付け、写真で宇宙を調べることができるようになった。

エポック・メイキングだったのはパロマー天文台の口径120 cmのシュミット望遠鏡が写真乾板を用いて北天の写真サーベイを行ったことだ。まだ1950年代のことだったが、宇宙をシステムティックに調べる現代天文学の幕開けとなった。限界等級は20等級程度だったが、宇宙に何が潜んでいるか調べることができるようになったこと

\*1 アルベルト・アインシュタインが自ら生み出した一般相対性理論に基づく宇宙方程式に、静的な宇宙を実現させるために導入した宇宙定数がダークエネルギーの走りと言える。1980年代、CCDカメラを用いたディープサーベイで銀河の個数密度と銀河の明るさの関係を調べると宇宙の幾何学的な構造を調べることができるようになった。これに基づいて、宇宙モデルの観測的なテストをやってみると、物質による質量密度は小さく、宇宙定数が存在するようなモデルのほうが、観測結果とよく合うことが日本の研究チームによって指摘されていた<sup>1)</sup>。測光観測の誤差や銀河進化モデルの不定性などがあるので、直ちに宇宙項の復活へと向かうことはなかったが、このような先駆的な研究が日本で行われていたことに感動する。

の意義は大きい。銀河系内のさまざまな星雲・星団から、多数の系外銀河、そして相互作用銀河、銀河群、銀河団などの宇宙の大規模な構造まで垣間見えるようになった。まさに [2] の面白い現象に気づいて、理解を深める研究に誘ってくれたのだ。

そして、1980年代、もう一つ画期的な出来事があった。CCD（電荷結合素子）が天文の観測に使われるようになったことだ。デジタル革命と言って良いだろう。パロマー天文台のサーベイは写真を用いたことと限界等級が浅かったこともあり、時代遅れになっていた。特に宇宙論的な観測には役に立てにくいこともあり、CCDを用いたサーベイが希求されていた。そこで登場したのがスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)<sup>2</sup> だった。口径2.5 mの専用望遠鏡で全天の1/4をカバーし、20億光年彼方までの宇宙地図が出来上がり、銀河宇宙の解明に大きな貢献をした。また、赤方偏移5を超えるクエーサーを多数発見し、宇宙再電離期の研究に拍車をかけた。この流れはすばる望遠鏡の超広視野カメラであるハイパー・スプリーム・カム<sup>3</sup> (HSC) による大規模サーベイへと受け継がれ、大きな成果が出始めている。SDSSの限界等級は23等だが、HSCでは26等まで深くなる（広域サーベイモード）。SDSSでは見えなかった宇宙の姿が着々と見え始めてきている。

### モニター

もう一つの宇宙の探究法は“モニター”である。現在でいうところのtime domain astronomyのことだ。

宇宙のモニターは、じつは昔から脈々と行われてきた。もちろん、肉眼でのモニターだ。最初の偉大な成果は惑星の発見だ。昔の人々は天空の世界は悠久であり、変わらないものとして崇めていた。したがって、規則正しく日周運動をする星は“恒なる星”，すなわち恒星と呼ばれるに至った。一方、夜空を徘徊するように移動していく星を“惑う星”，すなわち惑星と名づけ、恒星とは区別

することができた。惑星の正しい理解に至るまでは紆余曲折があったが、太陽系の発見につながったことはいうまでもない。また、肉眼によるモニターは惑星のみならず、突発的な現象が天界では起こることに気づいていた。流星、彗星、変光星、超新星現象などである。流星と彗星は太陽系内の出来事だが、肉眼による観測でも銀河系内の変光星や超新星は認識されていたのだから、人間の能力は偉大だ。

そして、望遠鏡と写真を組み合わせたモニターでは20世紀に入ってから大発見があった。それはセファイド型変光星の発見に端を発する。ヘンリエッタ・リービットは南半球の天文台で大小マゼラン雲の写真測光モニターを命ぜられ、観測に打ち込んだ。そのとき、彼女はある規則的な変光をする星がたくさんあることに気がついたのだ。それがセファイド型変光星だった。星の脈動に起因する変光だが、その変光には重要な規則性があった。明るい変光星のほうが変光の周期が長いのだ。彼女が幸運だったのは観測された変光星がいずれも距離の定まった大小マゼラン雲の中にあることだった。見掛け上明るい星は、絶対的な光度も明るいことになる。つまり、変光周期を測定すれば星の絶対光度が決まるので、見掛けの明るさからその星までの距離がわかるのだ。この原理を使えば銀河系内のセファイド型変光星までの距離もわかるし、他の銀河のセファイド型変光星を見つければ、その銀河までの距離がわかってしまうのだ。1920年代、天文学には大問題がのし上がっていた。渦巻星雲は銀河系の中にある天体なのか、それとも銀河系とは独立した天体（つまり別の銀河）なのかという問題だ。1920年、この問題に決着をつけるべく“大論争(The Great Debate)”が行われたが、結論を得るには至らなかった。当然である。渦巻星雲までの距離がわからなかったからだ。しかし、セファイド型変光星の秘密を嗅ぎつけたエドウィン・ハッブルはアンドロメダ星雲の中のセファイド型変光星を見つければ距離が

わかることに気がついた。そして、彼は当時世界最大の口径2.5 mのフッカー望遠鏡(米国カリフォルニア州にあるウイilson山天文台)を使って、大仕事を成し遂げた。ついにアンドロメダ銀河までの距離の測定に成功したのだ。彼が得た値は100万光年。現在得られている値、250万光年、に比べて小さな値だったが、銀河系の大きさ(10万光年)に比べれば桁で大きい。アンドロメダ星雲はアンドロメダ銀河に昇格したのである。こうして、変光星のモニター観測は、それまでの銀河系の世界から、多数の銀河が存在する銀河宇宙の世界へと我々を誘ったのである。

宇宙論といえば、ディープ・サーベイ(深宇宙探査)がまず頭の中に浮かぶ。しかし、今見たように、宇宙論の大変革は20世紀初頭のモニター観測からもたらされた。そして歴史は繰り返される。20世紀の最後を飾る宇宙論の大発見もモニターからもたらされた。遠方宇宙で発生する超新星探査が暗黒エネルギーの観測的証拠となったのだ。Ia型超新星は最大光度がほぼ一定なので、宇宙の灯台と呼ばれる。さまざまな時代(赤方偏移)で発生するIa型超新星の見かけの明るさを調べると、宇宙膨張の様子がわかる。その結果、宇宙誕生後、最初の70億年の間、減速膨張を続けていた宇宙は、その後加速膨張フェーズに転じていたことが判明したのだ<sup>4)</sup>。

モニター観測による、もう一つのブレークスルーは系外惑星の発見だ。1995年、ペガスス座51番星に惑星が発見されて以来、今では数千個を数えるに至っている。地球に似た惑星も見つかりつつあり、宇宙生命体の研究も盛んに行われるようになった。惑星の摂動による主星のふらつきをモニターする(ドップラー法)。主星の前を惑星が横切るときの減光を測光観測でモニターする(掩蔽法)。天の変動を見守るモニターはやはり欠かせない観測モードであることがわかる。タイム・ドメイン・天文学。一昔前までは耳慣れない言葉だった。しかし、今やこの言葉を日常的に耳

にする。時代の寵児とも言える天文学の研究分野にのし上がってきたのだ。

### セレンディピティー

宇宙を観測する基本的なモードとして“サーベイ”と“モニター”を紹介した。では、宇宙の観測がこの二つのモードで語り尽くされるかというところ、そうではない。自然科学の分野では“偶然の発見(serendipitous discovery)”が大きな役割を果たしてきた経緯がある。

天文学ではなく医学の世界の話だが、ペニシリンの発見がその最たるものだろう。英国の細菌学者、アレキサンダー・フレミングは捨てようと思ったペトリ皿で青カビが黄色ブドウ球菌の発育を阻止していることに気がついた。これが人類史上初の抗生物質、ペニシリンの発見につながったのだ。フレミングは実験室の整理整頓に無頓着な人だったようだが、それが世紀の大発見につながるのだから面白い。

化学の世界ではノーベル化学賞を受賞した田中耕一氏が偶然の発見に恵まれた人だ。タンパク質を気化・イオン化することに没頭していた彼は、ある日間違えてグリセロールとコバルトの混合物を作ってしまったが、あえて実験してみると見事にタンパク質がレーザー照射によって気化したのである。彼は作った混合物が間違いの産物であることを知っていた。普通なら捨てるどころだ。しかし、捨てなかった。それがノーベル賞級の大成果に結実したのだから、不思議だ。単に、“運”という言葉で片付けられない何か。それを田中氏がもっていたと考えるほうが良いのかもしれない。

天文学に目を向ければ、やはり“捨てずに良かった”という話がある。大内正己氏のHIMIKOの発見がそれに該当する<sup>5), 6)</sup>。HIMIKOはすばるXMM-Newton ディープ・サーベイの天域で発見された輝線天体である。強い輝線を検出するために用いられた狭帯域フィルターはNB921なので、輝線がライマン $\alpha$ 線ならば赤方偏移 $z=6.6$ のライ

マン $\alpha$ 輝線銀河 (Lyman $\alpha$  Emitter; LAE) になる。一目見たとき、大内氏は低赤方偏移の輝線銀河だろうと思ったそうである。なぜなら LAE にしては明るくサイズも大きめだったからだ。NB921 の場合、 $z=1.2$  の [O II] 輝線銀河や  $z=0.7$  の [O III] 輝線銀河も見つかる。大内氏のメインターゲットは LAE である。ケック望遠鏡による分光フォローアップ観測をするとき、LAE 候補天体のリストに HIMIKO を入れるかどうか迷ったそうである。低赤方偏移の輝線銀河なら観測するのは時間の無駄になる。しかし、なんとなく気になって、サンプルに残した。それが HIMIKO という巨大な超遠方の LAE の発見につながったのだ。もし、サンプルに入れなかったら、私たちは HIMIKO に気づかなかった時代を過ごしていたはずである。

天文学的なもう一つのセレンディピティーは分光観測のときに訪れることがある。分光観測の標準的なモードはスリット分光である。目的の天体の光をスリットに導き観測する。スリットは比較的長めに設定されていることが多いので、たまたま目的の天体以外のものがスリットに入ることがある。私たちは超高光度赤外線銀河の代表格である Arp220 の周辺に見える銀河が Arp220 のそばにある銀河か確認するためにケック望遠鏡でスリット分光観測をしたことがあった。観測を終えてデータを見てみると意外な発見が待ち受けていた。Arp220 は赤方偏移  $z\sim 0.02$  の近傍銀河である。しかし、赤方偏移  $z\sim 0.5$  の輝線銀河が3個も検出されていたのである<sup>7)</sup>。1個だけでも驚きだが、偶然は3個ものプレゼントを私たちに与えてくれたことになる\*2。

最近では、ALMA (Atacama Large Millimeter-Submillimeter Array) がセレンディピタスな発見

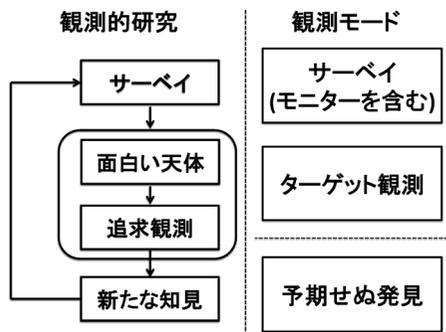


図1 天文学の研究手法。モニターの場合はサーベイの項目の箇所にモニターをはめ込めば良い。

に貢献してきている。感度が良いだけでなく、観測そのものが、ある周波数帯をカバーしているため、撮像分光観測 (imaging spectroscopy) が基本モードになっているためである。仮に既知の天体をターゲットにして観測したとしても、カバーしている視野内に異なる速度 (あるいは赤方偏移) の天体が紛れ込んでいると、それらが検出されてしまうのだ。その一例を挙げておこう。近傍の相互作用銀河 VV114 の活動性の起源を調べるために高密度分子ガスのトレーサーである HCO<sup>+</sup> と HCN で観測したところ、VV114 の近くに赤方偏移  $z=2$  を超える遠方銀河が見つかったのだ<sup>8),9)</sup>。そして、この種の発見は赤方偏移  $z=6$  を超える宇宙でも頻発している<sup>10)-13)</sup>。ALMA, 恐るべし。そう言うしかないほど ALMA の観測能力は高い<sup>14)</sup>。

では、この辺りで宇宙の観測モードのまとめをしておこう。基本はサーベイとモニターである。しかし、それに加えてセレンディピティーによる予期せぬ発見が面白い味付けしてくれるところだろう。この全貌を図1にまとめたが、ここではサーベイを例にしている。モニターの場合はサーベイの部分にモニターをはめ込めば良い。

\*2 論文をアーカイブに投稿した翌日、一通のメールが届いた。差出人はホールトン・チップ・アープ。Arp220 の名前になっているアープ氏からだ。「あなたたちが発見した3個の輝線銀河は Arp220 から吹き出されたものに違いない」彼はクエーサーなどで観測される大きな赤方偏移は近傍の銀河の中心から吹き出されたものであるという説を提案しているのだ。さすがに、返事の書きようがなかったことを覚えている。

サーベイやモニターの目的は何と言っても宇宙を理解するのに役立つ良い天体（ターゲット）を探すことだ。これが見つかる、フォローアップ観測を行う。この観測はターゲット観測になる。新たな知見が得られれば、また新たなサーベイやモニターを行う。つまり

- ・サーベイ・モニター
- ・ターゲット観測

のループを繰り返しながら、私たちは宇宙の理解を深めていくのである。それにセレンディピティーによる新発見が加わり、私たちを助けてくれる。

### 3. ディープ・サーベイ

ここで、サーベイについてももう少し詳しく考えてみることにしよう。サーベイには三つのパラメーターがある。

- ・波長（あるいは周波数）
- ・天域の広さ
- ・深さ（限界等級）

ここでは遠方銀河探査を想定して、とりあえず可視光から近赤外線を波長として選んでみる。天域の広さと深さはカップルしている。広い天域を観測するには時間がかかるので、深さを追求できない。つまり、目的に応じて天域の広さと深さの組み合わせが決まる。

一つ良い例がある。それは現在すばる望遠鏡のハイパー・スプリーム・カム（Hyper Suprime-Cam; HSC）で行われているすばる戦略枠観測プロジェクトである（Subaru Strategic Program; SSP）。HSC-SSPでは重厚なサーベイにするために、Wide, Deep, および Ultradeep の三つのレイヤーを設定

しサーベイを進めてきている（表1）。

Ultradeep に着目すると限界等級は28等で、地上の可視光望遠鏡によるサーベイでは最も深い等級に相当する。スプリーム・カムで行われたすばるディープ・フィールド<sup>16)</sup> (SDF) やすばる・XMM-Newton ディープ・サーベイ<sup>17)</sup> (SXDS) でもこの限界等級を実現していた。

地上望遠鏡によるディープ・サーベイでは、現時点ですばる望遠鏡の右に出るものはいない。SDSS や Pan-STARRS<sup>18)</sup> (Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System) はたかだか口径2 m クラスの望遠鏡による広域サーベイであり、限界等級はUltradeep に比べて5等級も浅い。2022年にサーベイを開始予定の口径8.4 m の望遠鏡LSST (Large Synoptic Survey Telescope) によるサーベイがようやくHSC-SSP に追いつくだろう<sup>19)</sup>。

ハッブル宇宙望遠鏡 (Hubble Space Telescope; HST) は口径2.4 m の反射望遠鏡だが<sup>3)</sup>、地球大気の影響を受けないので、ディープ・サーベイには最適である。そのため、ハッブル・ディープ・フィールド<sup>20)-22)</sup> (HDF) 以来、ウルトラ・ディープ・フィールド<sup>23)</sup> (UDFあるいはHUDF) やハッブル・フロンティア・フィールド<sup>24)</sup> (HFF) の観測で、遠方銀河の記録を次々と更新してきている。HFFは銀河団による強い重力レンズ効果の助けを借りるので、現時点では史上最強のディープ・サーベイになっていることは間違いない。

### 4. 究極のサーベイ

現状のディープ・サーベイを紹介したが、近未

表1 HSC-SSPで採用されている三つのサーベイモード<sup>15)</sup>。

Layer	Area [deg <sup>2</sup> ]	# of HSC fields	Filters & Depth	Comoving volume [h <sup>-3</sup> Gpc <sup>3</sup> ]	Key Science
Wide	1,400	916	grizy ( $r \approx 26$ )	$\sim 4.4$ ( $z < 2$ )	WL cosmology, $z \sim 1$ gals, clusters
Deep	27	15	grizy+3NBs ( $r \approx 27$ )	$\sim 0.5$ ( $1 < z < 5$ )	$z \lesssim 2$ gals, reionization, WL calib.
Ultradeep	3.5	2	grizy+3NBs ( $r \approx 28$ )	$\sim 0.07$ ( $2 < z < 7$ )	$z \gtrsim 2$ gals, reionization, SNeIa

来的なディープ・サーベイはどうなるだろう。地上望遠鏡は口径30 mクラスの望遠鏡の時代に入り、TMT<sup>25)</sup> (Thirty Meter Telescope), E-ELT<sup>26)</sup> (European Extremely Large Telescope), GMT<sup>27)</sup> (Giant Magellan Telescope) が20年代中盤から後半にかけて動き出す。また、宇宙望遠鏡ではHSTの後継機である口径6.5 mのJWST<sup>28)</sup> (James Webb Space Telescope) が2018年に打ち上げが予定されている。これら次世代の超大型望遠鏡を用いると、ディープ・サーベイの限界等級は33等級に達する。では、この限界等級で私たちは宇宙の果てを見ることはできるのだろうか？

残念ながら、答えはノーである。私たちが宇宙の果てを見るには限界等級を40等まで下げる必要があるからだ。なぜ、40等なのか？理由は二つある。

まず、最初のゴールは初代星、宇宙の一番星を見ることだ。初代星は宇宙が誕生してから2億年ぐらいいて生まれると考えられている。赤方偏移でいうと、 $z \sim 30$ だ。仮に初代星の質量が100と500  $M_{\odot}$  (太陽質量) とした場合、どのぐらいの明るさで見えるかをまとめたものを表2に示した。もし、 $z=30$ で質量が100  $M_{\odot}$ の初代星が1個生ま

表2 初代星の見掛けの等級。形成時期として $z=10, 20, \text{および } 30$ の三つの場合を仮定してある。静止波長1,500 Åでの等級を与えてある。ここでは、初代星のスペクトルエネルギー分布を10万Kの黒体放射で近似している。このとき初代星の質量100と500  $M_{\odot}$ の場合、輻射光度はそれぞれ $10^{6.1}$ と $10^{7.1} L_{\odot}$  (太陽光度) である<sup>29)</sup>。

$M_u$ ( $M_{\odot}$ )	$N$ (個)	$z=10$ (1.65 $\mu\text{m}$ )	$z=20$ (3.15 $\mu\text{m}$ )	$z=30$ (4.65 $\mu\text{m}$ )
500	1	38.4	39.3	39.9
500	100	33.4	34.3	34.9
500	10,000	28.4	29.4	29.9
100	1	40.9	41.8	42.4
100	100	35.9	36.8	37.4
100	10,000	30.9	31.8	32.4

れたとすると、見かけの等級 ( $m_{1500}$ , 静止波長1,500 Åでの等級) は観測波長4.65  $\mu\text{m}$ で42.4等である。あまりにも暗い。TMTやJWSTをもってしても見えない。重力レンズ効果で約4等級のゲインを稼げたとしても、これら望遠鏡の限界等級は37等級でしかない。すごいと言えはすごいのだが、これを達成できる天域は限られていて、確率はあまりにも低い。

もう一つのゴールは太陽系の果てである。私たちはまだ太陽系の果てを見ていない。太陽系内で今までに見つかった最も遠い天体は太陽系外縁天体の一つであるセドナである<sup>30)</sup>。しかし、その距離は1,012天文単位 (au) でしかなく (遠日点距離)、太陽系の果てにある天体とはいえない (図2)。

現在のところ、太陽系の果てにあるものはオールトの雲であると考えられている<sup>31), 32)</sup>。言わずと知れた彗星の故郷だ (図3)。しかし、その姿を見たものは誰もいない。本当にあるのだろうか？あるなら見てみたい。なぜなら、それが太陽系の果てだからだ。

オールトの雲の性質をまとめると、以下のようになる<sup>31), 32)</sup>。

- 太陽からの距離 $\sim 50,000\text{--}150,000$  au
- 彗星核の個数 $\sim 10^{11}$ 個
- 彗星核の総質量 $\sim 0.01\text{--}0.1$ 地球質量<sup>\*3</sup>

オールトの雲にある彗星核はどのぐらいの明るさなのだろう。わかりやすい例として冥王星を考えてみる。冥王星の太陽からの平均距離約40 auであり、見かけの等級は14等である。簡単のため、冥王星が40,000 auの距離にあるとすると、点源の場合  $(40/40,000)^2$  倍 $=10^{-6}$  倍の明るさになる。15等暗くなるので29等である。しかし、そのため、太陽光を反射する面積 (立体角) も $10^{-6}$  倍になるのでもう15等暗くなり、なんと44等星でしかない。冥王星は準惑星であり、直径が約2,370 km、質量は $1.3 \times 10^{22}$  kgもある。またア

\*3 最近の評価では、彗星核の個数は $10^{12}$ 個以上、総質量も地球の数十倍とされている<sup>33)</sup>。

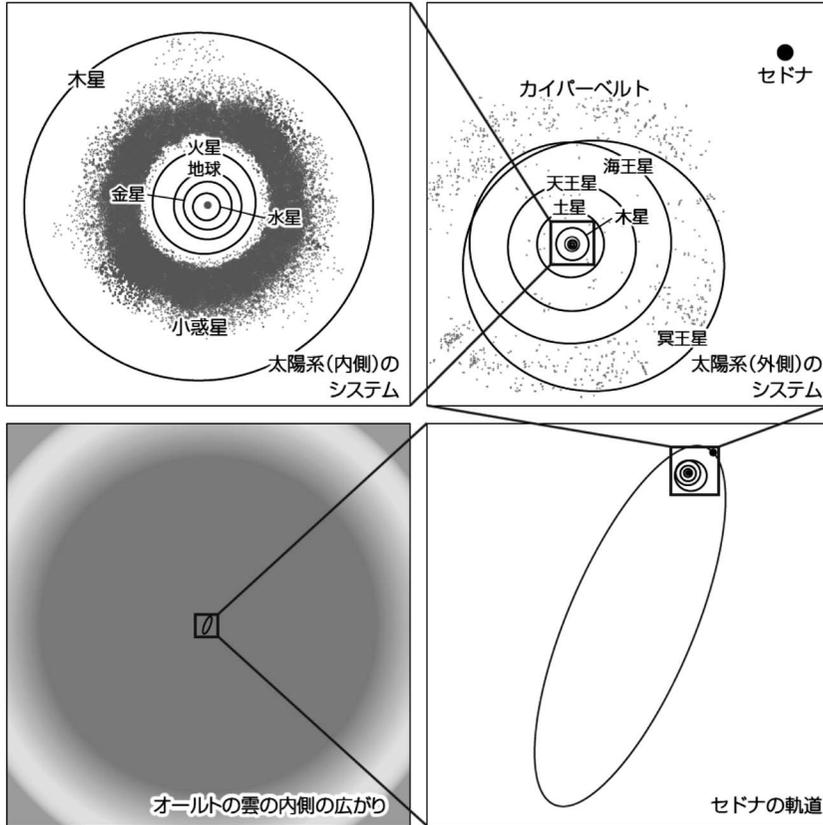


図2 セドナの軌道 (右下). オールトの雲とのサイズ比較は左下にある (NASA/JPL).

ルベドは0.56と大きめの値をとる. 一方, 彗星の代表格であるハレー彗星の大きさは長径でも16 kmしかなく, 質量は $3 \times 10^{14}$  kgでしかない. 彗星核で最大のものは約40 kmのサイズをもつが(例: ヘールボップ彗星), アルベドは平均的には0.04しかない. オールトの雲にある彗星核を検出するのは至難の技であることがわかる. しかし, 諦めてはいけない. まずは探してみようと思うことが大切だ.

### 5. 目標を決める

ここまで, 宇宙の果ての初代星と, 太陽系の果てのオールトの雲にある彗星核を見ることを考えてきた. 楽観的にまとめると以下ようになる.

- ・初代星: 42.4等 (質量が $100 M_{\odot}$ の場合)

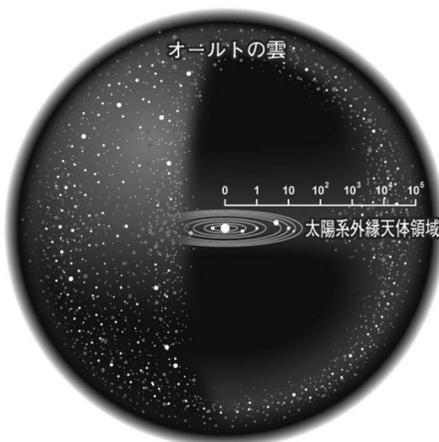


図3 オールトの雲の概念図 (理科年表).

・太陽からの距離40,000 auにある冥王星クラスの天体: 44等

楽観的にまとめたものの、絶望的に暗い。初代星の場合、最近の研究では太陽質量程度の星も生まれそうであることがわかってきている。質量が100  $M_{\odot}$ の場合でも40等より暗いものだから、とても見えないだろう。オールトの雲にある彗星核も冥王星よりはるかに小さいだろうから事情は変わらない。しかし、一つの目標として40等の天体を見つけるディープ・サーベイを企画することは重要だろう。宇宙は人類に優しい。重力レンズを仕込んでくれたり、予想外の質量の天体を用意してくれたりしている可能性もあるだろう。後者の良い例はすでに紹介したHIMIKOの発見である。

迷ってはいけない。まずは、サーベイだ。そこで、未来予想図の中で思い描く究極のサーベイの目標として、まずは限界等級を40等としたい。ささやかな夢だ。

しかし、ただ単に積分時間を稼いで、40等の天体を探すだけでは物足りない。できれば、限界等級40等で全天をモニターしたい。なぜなら、天界の変動を見極めたいからだ。まず、膨大な数の系外惑星が見つかるだろう。もちろん、変光星、新星や超新星現象の発見はお手のものである。そして、ガンマ線バーストや重力波の対応天体の探査にも役立つ。現在、ガンマ線バーストや重力波が発生すると大規模なToO (Target of Opportunity) 観測が発動される。可視光で該当する天体を同定するためだ。しかし、限界等級40等で全天をモニターしている時代が来れば、もうそれを発動する必要もない。

もう一つ面白いことがわかる。太陽系についてだ。太陽からの距離40,000 auにある冥王星クラスの天体が太陽の周りをケプラー回転している場合、天球面での移動量は1年あたり0.16秒角にな

る。つまり、何年もモニターすれば、40等の移動天体を検出できるのだ。オールトの雲より近いが、セドナよりはるかに遠くにある太陽系外縁天体を多数発見できるだろう。全貌とまではいかないにしても、太陽系の真の姿に肉薄できる可能性がある。

さて、ここまで考えてきたところで、私は限界を感じた。究極のサーベイとは何か？ この問題を一人で考えるのは得策ではない。答えはあるようで、ないからだ。こういうとき頼りになるのは友達だ。国立天文台三鷹キャンパスの生協でランチを食べるとき、二人の友人によく出くわす。八木雅文氏と川野元聡氏だ。早速二人に相談してみることにした\*4。予想どおり、議論百出。夢は広がる一方だ。とりあえず、ざっとまとめたものを紹介しよう。

## 6. ハイパー・スペース望遠鏡アレイ

では、40等の限界等級を実現するには、どのくらい大きな望遠鏡が必要だろうか。まず、地上の天文台は除外しよう。それは、初代星を見るためである。表2にあるように、 $z=30$ の初代星は紫外線(1,500 Å)の観測波長が4.65  $\mu\text{m}$ になる。近赤外線(波長1-5  $\mu\text{m}$ )というよりは中間赤外線(波長5-30  $\mu\text{m}$ )の波長帯に近い。そのため、宇宙望遠鏡でなければ検出は難しい。

JWSTは口径6.5 mの宇宙望遠鏡だが、限界等級は33等である<sup>28)</sup>。したがって、宇宙望遠鏡で限界等級40等を実現するには、 $6.5 \times 2.5^7 = 3,967$  mの口径が必要になる。一声、口径4,000 mの宇宙望遠鏡だ。これを飛翔体で実現するのは無理だろう。したがって、月面に設置するのが現実的なオプションになる。これだけ巨大な望遠鏡で全天モニターをするのだから、さらにことは大掛かりになる。仮に、視野10平方度を一挙に見ることのできるハイパー10・スプリーム・カムができた

\*4 この半年の間、彼らとはオールトの雲を見るにはどうしたら良いか、議論を楽しんできている。

として、全天をくまなく観るには、4,000台の口径4,000 mの月面望遠鏡アレイが必要になる。

月面への輸送を考えるとユニットとなる鏡の直径は2 mが限界だろう。もちろん将来的にはもっと大きな鏡を輸送できるようになっているかもしれないが、鏡の製作技術の問題と、大量生産の効率から、やはり直径2 mぐらいが妥当なところだろう。すると、面積比の計算から、1台あたり $(\pi[2,000\text{ m}]^2)/(\pi[1\text{ m}]^2)=400$ 万枚の鏡が必要である。4,000台分では160億枚の鏡を製作しなければならない。日本の光学メーカーが一挙に受注できるとは思えない。ポピュリズムが浸透していれば、国際的な談合の元に枚数が分配されるのだろうか。とはいえ、高度な光学技術をもっているメーカーにしか製作はできないので、世界中で数カ国程度だろう。GDPに比例した配分が行われるかもしれない。

ところで、JWSTの近赤外線観測装置NIRISS (The Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph) の場合、ピクセル分解能は0.065秒角/ピクセルである<sup>34)</sup>。これをスケールして、口径4,000 mの月面望遠鏡に同種の観測装置を作ると、ピクセル分解能を $1.1 \times 10^{-4}$ 秒角/ピクセルまで改善することができる。これはすごい値だが、技術的な問題点はいろいろ出てくるように思われる。

そもそも、10平方度カメラはできるのだろうか？ データレートは膨大であり、コンピューターの仕様を含めて解析ソフトの開発の問題もある。データ解析センターは月に設置されるだろうが、働いているのはアンドロイドだけになるだろう。

ただ、果たして月面望遠鏡アレイで本当に良いのかという問題は残っている。月面は重力が弱いので大型装置の設置・運用という意味ではメリットがある。しかし、自転周期は約1カ月で、いつも同じ面を地球に向けているため、全天サーベイには大きな制約が出てくる。月の極にある深いクレーターを利用するなど、方策はあるにしても克服すべき問題はたくさんあるだろう。では、火星

はどうだろう？ 自転周期は約1日なので全天サーベイは楽になるが、僅かとはいえ大気があり、砂嵐も起こる。地球ほどではないが、月に比べると重力も強い。また、月よりは圧倒的に遠いので、建設の道のは険しくなるだろう。一方、JWSTのようにラグランジュ点(L2)を選択することもオプションの一つだ。しかし、4,000台のアレイを果たして安定運用できるのだろうか？

等々、さまざまな問題に立ち向かうことになる。とはいえ、血湧き肉踊る話ではないか。今回、口径4,000 mのアレイという突拍子もない装置を考えたことで、全く予想もしなかった克服すべき新たな課題がでてきたからだ。必要は発明の母。やはり、まずは考えてみるのが大切なのだ。可視光から近赤外線(波長 $5\ \mu\text{m}$ まで)でのサーベイについては、多くの検討課題があるので、詳細は別の原稿に委ねることにしよう。

## 7. やがて西暦2525年がやってくる —待つ時代

口径4,000 mの望遠鏡を4,000台。月面に展開し、限界等級40等でモニタータイプの全天サーベイを行う。正直なところ、夢物語だ。このような計画が実現されることがあるだろうか？ あるとすれば、いつ頃のことだろう。昨今、時代の流れは驚くほど早い。ちょっと前までは夢物語の一つだった、車の自動運転ですら視野に入ってきた。数十年先には、私たち自身がハンドルを握ることはなくなっている可能性が高い。ハイホ(スマートフォンの次世代機で、ハイパーフォンの略)で車を呼びつけ、行き先を告げればおしまい。水陸空は問わない。そういう時代がいずれやってくる。

しかし、本稿で述べた計画はあまりにも荒唐無稽。実現するのは早くても数百年先かもしれない。そこでふと思い出した。“西暦2525年 (In The Year 2525)”という歌のことだ。歌い手はDenny ZagerとRick Evans。1969年。私が中学3年生の

頃の歌だ。

“♪ In the year twenty five twenty five...” やや、哀愁を帯びた歌い出しで始まるこの歌は、ご想像のとおり未来を憂える歌だ。西暦2525年、果たして男や女はいるだろうか？ そこから始まり西暦9595年まで歌は続いていく。

地球自身の問題（大規模地殻変動）もあるが、身勝手な人類がいつまで生きながらえるかは不明だ。しかし、あと500年ぐらいいってくれれば、月面天文台アレイはできているだろうか？ できていたとすれば、私たち天文学者がすることはほとんどない。限界等級40等でモニタータイプの全天サーベイが自動で行われている時代だからだ。その頃には、可視光だけでなく、ガンマ線から電波、そして重力波やニュートリノなど、すべての窓でウルトラモニター & サーベイが行われているだろう。何か突発現象が起きても、アラートが鳴るだけで、フォローアップも自動的に行われる。もちろん、ToOは死語になっている。

そう、私たちは“待つ時代”に生きていることになるのだ<sup>35)</sup>。とても給料はもらえそうもない。

## 8. 二人のワタナベさん

さて、本稿もそろそろおしまいだ。少し思い出話をしておこう。

私が天文学者として職を得たのは1986年のことだ。東京大学東京天文台銀河系部、木曾観測所付きの助手として採用された（現在の東京大学天文学教育研究センター木曾観測所）。30歳を少し超えた頃で、夢多き青春時代を送っていた。当時、私は二人のワタナベさんと夢を語り合ったことを覚えている。

一人目のワタナベさんは渡辺正明さんのことだ。私と同期で、無茶苦茶、頭の切れる人だった。渡辺さんは博士課程を終えると民間企業に就職されたが、それまでいろいろ議論する機会があった。二人で共著論文を書いた仲でもあった<sup>36)</sup>。その頃、木曾観測所では小平桂一先生が主導されていた近傍銀河の大規模サンプルの表面測光プロジェクトが走っており、彼は実働部隊の一人だった。私はビジターとして比較的頻りに観測に行っていたので、よく木曾観測所で会う機会があった。二人の話題はロボット望遠鏡だった。木曾観測所のシュミット望遠鏡をロボット化し、ドームまで出向かなくても自動運転で観測できるようにすることだった。渡辺さんが天文から離れてしまったので、立ち消えになったが、当時は真剣に考えていた企画だった。何しろ渡辺さんはコンピューター・ソフトの腕前がピカイチだったからだ。1980年代ではまだ夢物語だったが、21世紀を迎えた今、ロボット望遠鏡（Robotic Telescope）は日常になった<sup>35)</sup>。木曾観測所のシュミット望遠鏡も2014年からロボット運用が始まったことを記しておく。約30年かかったが、観測所のスタッフのご努力で渡辺さんと私の夢はかなった。深く感謝したい。

もう一人のワタナベさんは渡部潤一さんである（現在、国立天文台副台長）。渡部さんと語り合った夢は現在でも実現していない。その夢は、何と月面天文台計画だった。天文学は他の科学と異なり、実験装置の設置場所が重要である。物理や科学の実験ならば、どの国のどの町でやっても同じ結果が得られるが、天文台はそうはいかない。1980年代後半、日本の光赤外線コミュニティは岡山天体物理観測所の口径188 cm望遠鏡の後継

<sup>35)</sup> 1996年、私は客員研究員としてハワイ大学天文学研究所にいた。そのとき、リチャード・ウェインズコート氏とロボット望遠鏡の話で盛り上がったものだ。現在、マウナケア天文台のジェミニ北望遠鏡のある場所には、ハワイ大学が運用していた口径60 cmの望遠鏡があった。そこに、新たにロボット望遠鏡を設置して近赤外線サーベイをしたらどうか。そういう話だった。これは上手くいかなかったが、彼の努力はPan-STARRSプロジェクトに昇華した。ちなみに大型望遠鏡で最初にロボット化されたのは、私の記憶では口径3.5 mのWIYN望遠鏡ではないかと思う。少なくとも1990年代にはロボット運用されていて驚いたものだ。

機をどうするか議論していた。天候の優れない日本を離れ、ハワイ島のマウナケアの山頂に大望遠鏡を作ることを決断した頃だ。現在のすばる望遠鏡のことだが、当時はJNLT (Japanese National Large Telescope) と呼ばれ、口径は7.5 mだった。

そんな雰囲気の中、渡部さんと私はその次の望遠鏡のことを考えていた。現在ではTMT (Thirty Meter Telescope) への参加が決まっているが、当時の私たちの夢は一挙に月面に向かっていった。HSTの打ち上げが1990年なので、ずいぶん早い話ではあった。二人の論点は、地球大気の影響を受けず、安定した運用ができる点にあった。「月にネズミはいないのでケーブルなどが食いちぎられることもないね」などと、無用な心配までしていた。つくづく思う。幸せな日々だった。

そして、30年が経過した。還暦を過ぎた今、私は究極のサーベイで、また月面天文台アレイを議論している。「三つ子の魂百まで」、ということか。西暦2525年。果たして、夢は叶っているだろうか？

夢が叶うかどうかかわからないが、月面望遠鏡アレイの想像図を図4に示しておいた。説明は図のキャプションを見ていただきたい。

最後に、よく言われることだが、書いておこう。

夢は実現するためにあるのではない  
夢をもつことが大切なのだ

こう書いてみて、確信した。

若手の仕事は夢を語ることである

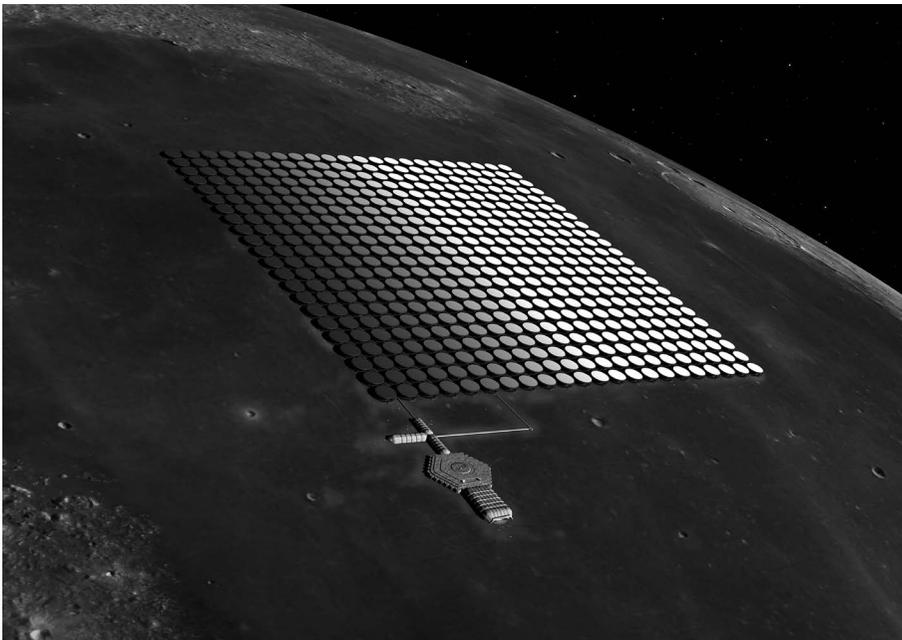


図4 ハイパー月面望遠鏡アレイの想像図 (一部)。全天サーベイの効率を考慮して月面の北半球と南半球に経度で90度ずらして8カ所に設置する。各アレイは $22 \times 22 = 484$ 台の口径4 kmの反射望遠鏡からなる。図に示したのは「晴れの海」に設置したアレイ。下側に見える施設はアレイを管理するための施設 (イラストの都合上、少し大きめに描かれている)。望遠鏡1台あたりに1台のAIロボットが割り当てられ望遠鏡の管理、観測の運用、データの一次処理などにあたる。施設には予備も含め500台のロボットがスタンバイされている。また、隕石による望遠鏡の破壊に備え、予備の口径4 kmの反射鏡も複数枚常備してある。なお、通信機器は施設の屋根に埋め込み型で設置されている。(イラスト: 池下章裕氏)

## 謝 辞

2017年3月11日と12日に東京大学で開催された学術会議シンポジウム「天文学・宇宙物理学のさらなる地平を探る」の企画とその実現にご尽力いただいた海部宣男、須藤靖、および山田亨の各氏に深く感謝いたします。シニアから若手まで日本の天文学の将来や若手のキャリアアップに関して、いまだかつてない深いレベルでの議論が行われた会議であったと思う。このような議論を積み重ねていくことの重要性を再認識した次第である。可視光帯と近赤外線帯での究極のサーベイについては八木雅文氏と川野元聡氏との有益な議論に負うところが大きい。また、井上昭雄、松田有一、および梅畑豪紀の各氏にはALMAの観測能力の高さに関して有意義なご議論をしていただいた。イラストレーターの池下章裕氏には月面望遠鏡アレイの想像図を描いていただきました(図4)。素晴らしいイラストで、もうアレイは完成したのかと思ってしまうほどの出色の出来で、深く感謝いたします。最後に、前述の学術会議シンポジウムに参加され、熱心にご議論を展開してくださったすべての皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Fukugita M., et al., 1990, ApJ 361, L1
- 2) York D. G., et al., 2000, AJ 120, 1579
- 3) Miyazaki S., et al., 2012, SPIE 8446, 0Z
- 4) パネク R. (谷口義明訳), 2011, 4%の宇宙(ソフトバンククリエイティブ): 凌ぎを削った超新星探査宇宙論の現場がわかる解説書
- 5) Ouchi M., et al., 2009, ApJ 696, 1164
- 6) Ouchi M., et al., 2013, ApJ 778, 102
- 7) Ohyama Y., et al., 1999, AJ 117, 1617
- 8) Tamura Y., et al., 2014, ApJ 781, L39
- 9) Iono D., et al., 2013, PASJ 65, L7
- 10) Aravena M., et al., 2016, ApJ 833, 71
- 11) Miller T. B., et al., 2016, arXiv:161108552
- 12) Carniani S., et al., 2017, arXiv:170103468
- 13) Hayatsu N. H., et al., 2017, PASJ 69, 45
- 14) 谷口義明, 2017, 「ALMAによる銀河の観測」, 天文月報 110, 185
- 15) Miyazaki S., et al., 2012, Wide-Field Imaging with Hyper Suprime-Cam: Cosmology and Galaxy Evolution, A Strategic Survey Proposal for the Subaru Tele-

scope

- 16) Kashikawa N., et al., 2004, PASJ 56, 1011
- 17) Furusawa H., et al., 2008, ApJS 176, 1
- 18) [http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/panstarrs\\_release/](http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/panstarrs_release/)
- 19) <https://www.lsst.org/about>
- 20) Williams R. E., et al., 1996, AJ 112, 1335
- 21) Williams R. E., et al., 2000, AJ 120, 2735
- 22) Ferguson H. C., et al., 2000, ARA&A 38, 667
- 23) <http://hubblesite.org/image/3380/news/14-deep-fields>
- 24) <http://www.stsci.edu/hst/campaigns/frontier-fields/>
- 25) <http://tmt.mtk.nao.ac.jp/intro-j.html>
- 26) <http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt/>
- 27) <https://www.gmto.org>
- 28) <https://jwst.nasa.gov>
- 29) Bahena D., Klapp J., 2010, Ap&SS 327, 219
- 30) Gaudi B., et al., 2005, ApJ 629, L49
- 31) Oort J. H., 1950, BAN 11, 91
- 32) Oort J. H., 1951, The Observatory 71, 129
- 33) Weissman P. R., 1996, ASPC 107, 265
- 34) [https://jwst.stsci.edu/files/live/sites/jwst/files/home/science%20planning/Technical%20documents/JWST-PocketBooklet\\_January17.pdf](https://jwst.stsci.edu/files/live/sites/jwst/files/home/science%20planning/Technical%20documents/JWST-PocketBooklet_January17.pdf)
- 35) 谷口義明, 2017, 銀河宇宙観測の最前線—「ハッブル」と「すばる」の壮大なコラボ(海鳴社); 日本天文学会100周年記念として天文月報特別号が2008年に出版された。その号に寄稿した100年後の天文学の予想図を書いた原稿「コスモスな日々—2108」を第三部に掲載してあるので参考にしてほしい。
- 36) Taniguchi Y., Watanabe M., 1987, ApJ 313, 89

## An Ultimate Survey of the Universe

Yoshiaki TANIGUCHI

*The Open University of Japan, 2-11 Wakaba, Mihama-ku, Chiba 261-8586, Japan*

Abstract: Exploring the Universe has been one of main issues in natural science for a long time since the era of Ancient Greece. Although we have not yet fully understood the nature of the Universe including elemental physics, modern astronomy has already explored the fundamental cosmological parameters such as the age (13.8 Gyr) and the composition of our Universe such as baryon, dark matter, and dark energy with small observational errors (*i.e.*, to sub percent levels). Therefore, a question arises as to what we shall do in astronomy anymore. Namely, we now have some locked up feeling. To break up this situation, we dare to consider what is an ultimate survey of the Universe in far future (*e.g.*, in the year 2525).