

## 宇宙シリーズⅠ 宇宙と民生 宇宙太陽光発電

岡本 祥一 予科5-7  
(川口市) 航空通信16-4



### 目次

#### 宇宙シリーズ

- I 太陽光発電 (秩父144号)
- II 膨張する宇宙① (秩父145号)
- III 膨張する宇宙② (秩父146号)
- IV 宇宙と軍事①宇宙平和条約 (秩父147号)
- V 宇宙と軍事②宇宙ゴミの除去 (秩父148号)
- VI 宇宙旅行 (秩父149号)
- VII 宇宙移住①・月へ (秩父151号)
- VIII 宇宙移住②・火星へ (秩父152号)

### I. まえがき

宇宙の話が面白い。宇宙科学の分野では、まだ正体が分からないダークマター(暗黒物質)、ダークエネルギー(暗黒エネルギー)、ホーキング博士(1942~2019)らによる解析が進んできたブラックホール<sup>\*1</sup>、重力波その他多くの検討課題があり、各国で研究が熱心に進められている。

一方、大気圏と宇宙空間の境界とされる地上約100kmを超える外側に注目して、実用面での活用を図る宇宙ビジネスが発展している。市場規模は現在の約39兆円から2040年代には100~300兆円に膨らむとの予測があり、成長が注目されている。

現時点での宇宙ビジネスの概要を以下にまとめてみた。

#### 1. 人工衛星の利用

##### イ. 通信関係

- a. 衛星放送
- b. 高速衛星通信の整備
- c. 災害時の通信確保
- d. 移動通信：高速運航中の車、航空機への大容量通信サービス

(2019/4, アマゾンが衛星3000基打ち上げ計画)

- ロ. 地球表面の監視
  - a. 天気予報
  - b. 地形把握
  - c. 農作物の生育予測
  - d. 魚群探査
- ハ. 高精度位置情報の提供
  - a. 現在地検索(GPS)
  - b. 山間部などでの測量支援

#### 2. 宇宙空間の利用

- 1. 無重量空間の利用
  - a. 宇宙太陽光発電
  - b. 製薬の開発
  - c. 資源探査
- 2. 宇宙空間の環境保護；人口衛星の破片など宇宙ゴミの掃除

#### 3. 軍事利用

世界の列強各国は、陸海空三軍の他に宇宙での覇権を目指して宇宙軍とも呼ぶべき組織を設置し、強化を続けている。空中戦に代わり宇宙戦の時代になるのであろうか。

我が国では宇宙政策の基本を定める宇宙基本計画工程表を2018年12月に改訂、安全保障との連携が強く打ち出されている。「防衛分野における準天頂利用システムおよび利用拡大の検討」が追加され、軍事利用に拍車がかかった状況にある。

安倍首相は本年度(2019年3月)防衛大の卒業式の訓辞で、「サイバー空間や宇宙空間での活動に各国がしのぎを削る時代である。陸、海、空の従来の枠組みにとらわれた発想のままではこの国を守り抜くことはできない」と述べている。

ここでは、我が国で開発の努力が進められている民生分野の宇宙太陽光発電に注目して報告する。この分野は、日本が世界的に一足先に進んでおり、実用化への期待が高まっているとのことである。

## II. 概要

宇宙太陽光発電衛星SSPS (Space Solar Power Satellite) は宇宙開発の機運が最も高まっていた1968年、米国のP.E.Glasler博士により提唱された発電システムである。

赤道上36,000km上空の衛星静止軌道に巨大な太陽光発電衛星を建設し、発電された電力をマイクロ波またはレーザー光を用いて地上に送り利用しようとする構想である。

この構想はオイルショックをきっかけに、1977～1980年にかけてNASA（米国宇宙局）とDoE（米国エネルギー省）が取り上げ検討された。米国全土の全電力をまかなうため、原子力発電5基分（500万kW）を目標に、重量約5万トン、受光面積5km×10km、送電アンテナ直径1kmの巨大衛星を年に2機ずつ、合計約60機を打ち上げる計画であった。しかし、莫大な費用と財政の緊縮方針により凍結され、全面的に撤退することとなった。

1990年代の後半に至り、環境問題への関心の高まりと技術面での進展から、米国NASAで「フレッシュルック」と呼ばれる宇宙太陽光発電の研究計画が再開された。この計画では、最初の計画を大幅に見直し、より現実的なシステム「サンタワー」の開発が進められた。1,000kmの上空に直径50～100mの円盤状の発電素子n箇を、カヌーの櫂のように木の葉状に接続した形状をしている。250MW級の建設費は実現可能性の高い80～150億ドルと見積もられている。しかしこの計画も実現には結びつかなかった。

その後米国の動きとしては、国防総省が

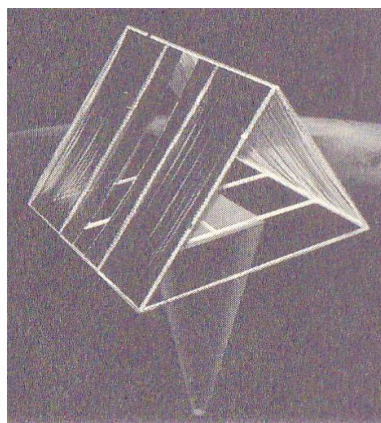
2007年10月、SSPSの開発計画案（Phase 0 Architecture Feasibility Study）を公表している。また、カリフォルニア工科大学などが中心となってノースロップ・グラマン社の出資を受けて新たな構想を進めているとのことである。

他に、カナダ、フランス、ドイツ、ロシア等でSSPSの研究が行われている。1999年に欧州宇宙機関（ESA）/ドイツ航空宇宙センター（DLR）により「欧州セイルタワー」概念が発表された。

## III. 日本版SSPS

日本では1980年代前半、米国での開発撤退にも関わらず、当時の旧宇宙科学研究所（2003年、宇宙航空研究開発機構に統合）で検討が開始されている。

1988年には当研究所が中心となり国立大学、国立研究機関が集まりSSPSの研究グループを結成、1991年には日本で初めて本格的にシステムを設計研究する「SPS2000」プロジェクトが立ち上がった。



第1図 SPS2000の概念図

36,000km上空の静止軌道ではなく、赤道上空1,100kmの低地球軌道を選び、重量240トン、発電能力16MW（日照時のみ送電）、336m×303mの発電面を2枚、地球を向いた面に送電システムを組み入れ、合わせて三面からなる正三角柱構

造である（第1図）。

受電対象は軌道の関係から赤道直下の国々となっていた。「SPS2000」は名前の通り2,000年打ち上げを目標としていたが、他の宇宙開発事業に対する優先順位が上がらず、研究グループは解散し実現に結びつかなかった。

#### IV. テザー型宇宙太陽光発電

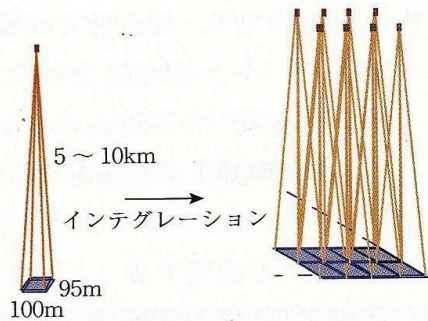
一方、1992年からは通産省（現在は経済産業省）の外郭団体である新エネルギー・産業総合開発機構（NEDO）により、SSPSに関する3年をかけた研究調査が行われた。

1998年には宇宙開発事業団（2003年にJAXAに統合）のグループが研究活動を開始、いくつかのタイプを設計、検討を続けている。

一連の動きの例として、経済産業省および同省関連団体からの委託を受けて（財）無人宇宙実験システム研究開発機構により検討された代表的なモデルを第2図に示す。2008年度「信学技法」<sup>☆2</sup>に発表されているテザー型と呼ばれる発電システムである。

発電面95m×100mの単位パネルを多数並べて一辺の長さが2.5kmになる計画である。単位パネルは片方の面に太陽電池、反対側の面に送電用のアンテナを持ち、二つの面の間にマイクロ波発信機器を配置、サンドイッチ型の送電一体型となっている。

この単位パネルを姿勢安定用の錘から4本のテザー（吊りひも）で結び、さらに25x25枚連結する。総重量約31,000トン、36,000km上空の静止軌道、発電能力2GW（地上で1GW）の計画である。



第2図 テザー型宇宙太陽光発電装置

引き続き2014年から2016年度ではマイクロ波無線送受電システムの高効率化、送受電システムの薄型・軽量化及びマイクロ波無線送受電技術を基盤とする研究開発に係るロードマップの策定に取り組んだ。

平成29年度からは、技術の更なる高度化に向けて、送受電部の高効率化や送受電技術の研究等を行い、開発した無線送受電技術の実証を行う事になっている。

2016年4月に閣議決定された「宇宙基本計画」の中に「宇宙太陽光発電」が次のように取り上げられている。

[エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取り組みや、太陽活動などの観測並びにそれに起因する宇宙環境検討が我が国の人工衛星などに及ぼす影響およびその対処方策等に関する研究を推進する。]

担当は文部科学省、経済産業省となっている。経済産業省やJAXA（宇宙航空研究開発機構）は、2045～50年の本格的稼働を目指し基礎的な技術の研究を続けている。今後の一層の開発努力を期待したい。

## IV.テザー方式の課題

### イ. 宇宙輸送コスト

宇宙発電システムの実現には低コストの宇宙大量輸送システムの実現が必須である。宇宙の商業利用が始まった2000年頃から輸送コストはやや低下し始めているが、現状約100万円/kg から経済的に現実的なものとなる1万円/kg 程度に下がることは近い将来考え難い状況にある。JAXAでは輸送費用低減を目指して、使い捨てではなくて、再使用可能なロケットの開発を開始している。

革新的輸送機の実現は20年程度の時間が必要と考えられているが、技術的には目標が立っている段階とのことである。

### ロ. 大規模テザー方式の構築技術

第2図に示した単位パネル1基を単位として、再使用型輸送機によりいったん低軌道へ輸送する。ここで軌道間輸送機（電気推進駆動）に積み替え、静止軌道まで、3～4ヶ月かけて輸送する。静止軌道で地上からの指示により単位パネルの自動展開を行い、機能を確認した上で、組み立て支援ロボットで本体への接続を行う。この方式であれば、建設に高価な有人活動が不要、軌道間輸送システムは現実的な規模で十分であり、さらに半導体の劣化回避が可能で、着実な建設が可能であろう。

### ハ. 長期間運用、維持(補修)する技術

宇宙空間で大型構造物を建設する場合、宇宙ゴミや宇宙塵の超高速衝突(10km/s以上)は回避できず構造的な対策が必要である。衝突体の影響はそのサイズの10倍程度に及ぶことを考慮して、一部が破損しても故障が伝搬しないように設計し、実用上衝突の影響が回避可能である。

### ニ. 高効率、安全な発送電、受電技術

1GWテザー方式の段階でのエネルギーフローを次に示す。全体の変換効率を上げるため、さらに検討が進められている。

第1表 1GWテザー方式のエネルギーフロー

|          |       |             |
|----------|-------|-------------|
| 太陽光強度    | 8.0GW |             |
| 発電ピーク    | 2.8GW | 太陽電池効率 35%  |
| 送電系への電力  | 1.6GW |             |
| 送電電力     | 1.4GW | μ波への変換効率85% |
| 送電アンテナ入力 | 1.2GW | 伝搬効率 97%    |
| 受信アンテナ出力 | 1GW   | DC電力変換効率85% |

## V. あとがき

我が国で設計された代表的なモデルとしてテザー方式の宇宙太陽光発電システムを取り上げた。技術的障壁が低いモデルではあるが、まだ多くの課題が残っている。今後一層の技術開発、課題解決を目指した継続的な努力を積み重ねることにより、人類社会の発展に基礎的な役割を担うことができるエネルギーシステム実現は可能であろう。

たとえ現在ではできなくても、やがては可能となろう。技術の進歩を信じたい。

2018年8月脱稿、

2019年4月一部補充

★1 最近(2019/04/12)、5,500万光年先の銀河にあるブラックホールを世界で初めて国際研究チームが直接観測に成功した。

★2 信学技法、SPS2002・01 (2002-07) (2002)。

## 宇宙シリーズⅡ 膨張する宇宙 ①

岡本 祥一 予科5-7  
(川口市) 航空通信16-4

### まえがき

その昔小学6年生の頃か、だだをこねて小遣いをせびり、月刊「小学生の科学」を本屋から取り寄せていた。あるとき、「膨張する宇宙」と題する解説(和文)があった。ケンブリッジ大学のエディントン教授によるものであったと記憶している。宇宙に強い関心を持つきっかけであった。その頃、東京の西郊外にあった我が家からは、月のない夜に満天の星空を楽しむことができた。天の川とは何か。大人になればお星様に行けるのか。宇宙が膨張するとはどういう事か。そして今、卒寿を過ぎて子供のころを思いだし、宇宙への関心が再燃、勉強を開始した。

「宇宙」の「宇」という漢字には「空間的な広がり」、「宙」には「時間的な広がり」という意味があるとされている。理化学事典によれば、「存在しうる限りの全空間、全時間およびそこに含まれる物質、エネルギーをいう」と記されている。つまり「宇宙」という言葉は地球や太陽が浮かぶ宇宙空間を指すだけでなく、宇宙誕生から現在、未来迄を貫く悠久の時間の流れを含んでいる。

## Ⅱ. 宇宙の誕生

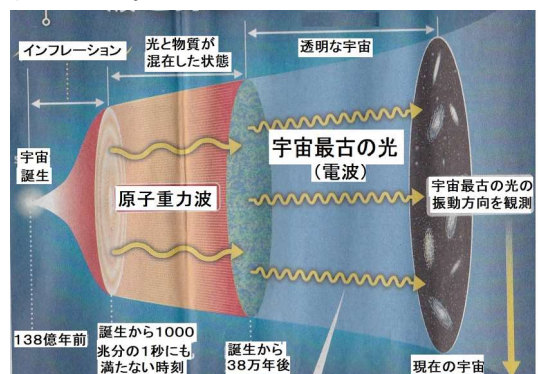
宇宙の起源に迫る画期的な発見は1929年、米国天文学者エドウィン・ハッブルによる。「宇宙にある全ての天

体は互いに遠ざかっている」、つまり「宇宙は膨張する」との観測結果を発表したのである。

「宇宙は膨張する」ということから時計の針を巻き戻してゆけば宇宙は収縮し、さらに時間をさかのぼってゆけばついには宇宙誕生の時代に行き着くであろうと考えられている。

ロシアの物理学者ジョウジ・ガモフ(1904~1968)は、1948年の論文で、収縮による初期宇宙の状態を超高温、超高密度であったと考え、「火の玉宇宙」のアイデアを提唱した。その後の観測結果からこの考えは次第に支持を集めた。現在では、宇宙は138億年前に“無と考えられる状態”から生まれ、生まれた直後は原子よりも小さく、 $10^{-3}$ 秒の短時間に $10^{43}$ 倍の大きさに急膨張したとする説が提案されている。

この最初の短時間での急激な膨張は「インフレーション」と呼ばれている。インフレーションが終わると同時に宇宙には物質と光が出現し、引き続き「ビッグバン」と呼ばれている超高温かつ超高密度の灼熱状態に移行したと考えられている。



第1図 宇宙の誕生

一説によれば、ビッグバンの最初は1兆度程度の高温度で素粒子だけが超高速で飛び交いぶつかり合う状態であったであろうとされている。つまり、「イ

ンフレーション」と呼ばれる極めて短時間の火爆により宇宙が誕生し、引き続きビッグバンと呼ばれる高温、高圧の状態が長期にわたり膨張を続け、次第に温度、圧力が低下、現状になったのであろうと考えられている。その過程で、例えば、10億度くらいになると中性子と陽子が反応して重水素が生じる。3千度くらいに温度が下がり、宇宙の大きさが現在の千分の1程度になると、質量が軽い電子は陽子に捕まり水素原子が形成される。すると、空間を飛び回っていた電子が無くなり、それまで電子の存在により吸収されていた光が宇宙空間に放出されるようになる。つまり灼熱状態の宇宙が透明になり光が放出されるようになる。この段階を「宇宙の晴れ上がり」と呼び、誕生後38万年後でのこととされている。この光は138億年（-38万年）かけて現在地球まで届いており、「宇宙背景放射」と呼ばれている。宇宙誕生38万年後まで閉じ込められていた光が解き放たれ、138億年かけて地球に届く間に宇宙空間が約千倍に膨張したため、光の波長も約千倍に引き延ばされ、数ミリ程度の波長のマイクロ波として現在観測されている。

このような宇宙の誕生と発展過程を第1図に模式的に示した。

「宇宙背景放射」の検出、発見は灼熱宇宙の「ビッグバン」が確かに過去にあった事を示す証拠と言われている。

以上の経緯から、宇宙誕生の初期においては素粒子だけが飛び交う状況と考えられ、極微の世界を取り扱う量子論の対象となっている。

ビッグバン初期に近い素粒子だけが存在する状況に似せて、例えば陽子や電子などの素粒子を人為的に光速に近くまで加速、正面衝突させ観測、解析する事ができれば、宇宙誕生の解明をはじめ、宇宙創生期の多くの未解明事項の解析が進むのではないか。そのような目的も含

めて、現在巨大加速器、「国際リニアコライダー（ILC）」の建設構想が日米欧協力して進められている。

ILCは地下に建設する長さ約20kmの直線状の加速器である。問題は巨額の費用である。光速に近い速度の素粒子間に起こる正面衝突の際の現象を正確に捉え、解析するには高度で大がかりな設備が必要である。測定機器などを含む建設費は約8,000億円、運転費も年間約400億円、日本の負担額は約4,100億円と試算されている。

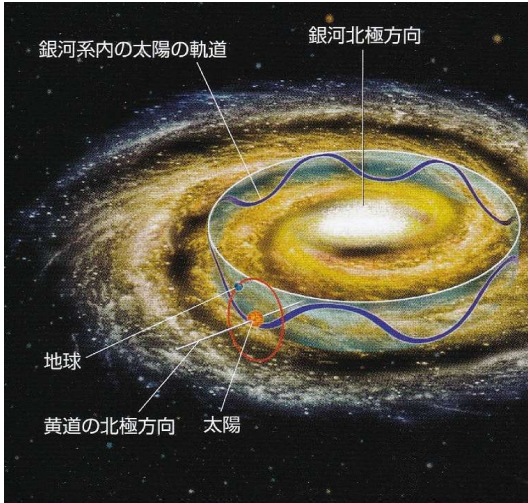
ILCは東北地方の北上山地が建設候補地になっている。学術会議は、検討委員会の意向「適正な国際費用の分担の見通しが得られておらず、誘致を支持するには至らない」との見解を受け、日本が誘致することに慎重な姿勢をしめした（2018年末）。

文部省はこの学術会議の意見を受け、現時点（2019年3月）で誘致の表明を見送った。しかし文部省は本計画には関心を示し、大型の科学プロジェクトを決める枠組みの中で検討を続ける意向を表明している。

### Ⅲ. 天の川

夜空に淡く輝く天の川。古代から人々の興味を掻き立てる、不思議な存在であった。東アジアでは川に見立てられ、彦星、織姫の民話を生んだ。西洋では、大神ゼウスの妻ヘラの乳が大空にほとばしり出たものとのギリシャ神話から「ミルクキーウェイ」と呼ばれて来た。

現代では、都会に住む我々にとって夜空は暗く、満天の星空、天の川の淡い光とは全く疎遠になってしまった。ただ、科学技術、とりわけ分光科学の進歩に伴い、天の川の正体は何かとの問いに正しい答えが可能になっている。



第2図 天の川の構造（想定図）

満天の星空そして天の川に初めて科学的な答えを与えたのはイタリアの科学者ガリレオ・ガリレイ（1564～1642）である。

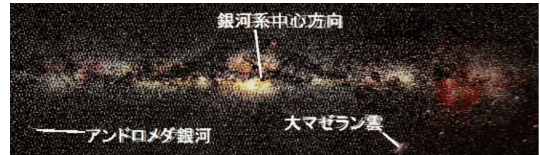
1609年、発明されたばかりの望遠鏡（直径4.5cm）を夜空に向け、天の川が膨大な星の集りであることを明らかにした。また、イギリスの天門学者ウィリアム・ハーシェル（1738～1822）は1785年、天の川は無数の星が凸レンズのような形に配置されたものであると結論した。

現在では、約千億～数千億箇の恒星の集まりである事、第2図の様に全体として渦巻き状であり、中央が膨らんでやや横長の目だま焼きのような形をしている事などが明らかになっている。その黄身にあたる明るい部分は、「バルジ」と呼ばれ、中心付近には強力な「ブラックホール」が存在し、太陽の約400万倍もの質量があると言われている。

円盤の厚みは太陽付近で0.2万光年、中心部分で1.5万光年、直径は10万光年と推定されており、かなり薄い事が分かる。

我らの太陽系は、天の川の中心から約2.6万光年離れた郊外とも言える場所

に位置している。太陽系の中から眺めると天の川の方法は渦巻き状の円盤の平面方向を見ることになり、目にはいる恒星からの光は円盤状の軸の方向より明るくなり、第3図のように夜空の帯として見る事になる。図中黒い影は、宇宙に漂う濃いチリが奥からの光を遮るために暗くみえているのである。

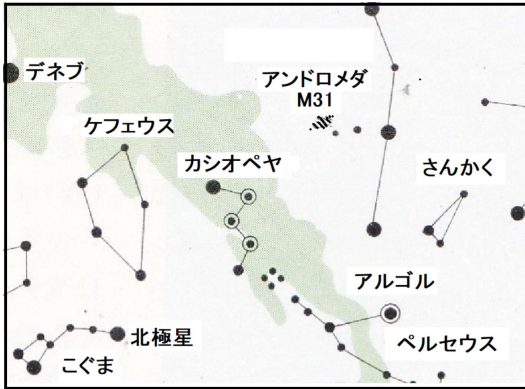


第3図 天の川銀河の中心部

天の川銀河系は渦巻き構造を保ちながら太陽系付近では2.5億年に1周のペースで回転運動をしている。この速度は秒速220kmにも及び、この動きに加えて、太陽系はこの回転によって銀河面を、第2図に示すように上下運動しながら回転している。

天の川銀河は20世紀初頭までは宇宙のすべてであると考えられていた。

1905年特殊相対性理論、1915年には一般相対性理論を発表したアインシュタインも天の川を含めた天空は宇宙全体であり、天体の全ては固定されている、つまり静的宇宙であると信じていた。しかし、1923年、ハッブルは口径1mの望遠鏡を使ってアンドロメダ大星雲（M31）を撮影したところ、沢山の星々が観察された。距離の計算結果から、65万光年と言う大きな値が求められた。天の川銀河の直径は約10万光年であるから、アンドロメダ大星雲は天の川銀河の遙か彼方に存在する銀河である天体である事が明らかになった。



第4図 アンドロメダ大星雲 (M31)

このたくさんの銀河があること、そしてお互いに近づいたり、離れたりにしていることが分かってきたのである。ハッブルによる動的宇宙像の確立は天文学の発展に多大な進歩をもたらした。しかしノーベル賞は受賞していない。当時では、天文学はノーベル賞の対象では無かったためと言われている。しかし彼の功績をたたえて、1985年打ち上げられた宇宙望遠鏡に彼の名前が残されている。ハッブル宇宙望遠鏡は宇宙構造の解明に多大な貢献を与えている。

アンドロメダ銀河と天の川銀河が互いに近づいている事は以前から知られていたが、ハッブル宇宙望遠鏡を用いた正確な測定により、接近速度が時速40万kmにもなることが分かった。そして40億年後に衝突するとされ、衝突のシュミレーション画像も造られている。

銀河と銀河とがぶつかるとうなるのであろうか。銀河の中の星どうしも激しくぶつかり合って地球も巻き込まれるのではないか。しかし、実際は、星々は銀河に比べてとても小さく、星同士の距離も非常に離れているので、衝突する可能性はほとんど無いと考えられている。

1929年、ハッブルが遠くの銀河ほど速いスピードで地球から遠ざかっている事を発見した。地球が宇宙の中心にあるわけではなく、これは宇宙全体の膨張

を意味している。全体が膨らんでいるため、どの星から見ても遠くの天体は距離に比例する速度で遠ざかっている事になる。

#### Ⅳ 重力。

理化学事典によれば、重力とは地球上に静止している物体が、地球から受ける力、地球の万有引力が主であるが、地球の自転にもとづく遠心力も加わる。なお、重力という言葉は、天文の分野では、地球に限らず万有引力の意味で用いられている。

17世紀の天才科学者、アイザック・ニュートンは「質量が大きい物体ほど強い重力をもつ、物体から距離が近いほど重力は強く、遠いほど弱い」ということを発見した。そして「万有引力の法則と呼ばれる数式で表現した。この数式を使えば、あらゆる物体に働く重力を完璧に計算できる。万有引力Fは、物体の質量、M,m、物体間の距離rとして

$$F=GMm/r^2$$

Gは万有引力常数と呼ばれる比例常数である。

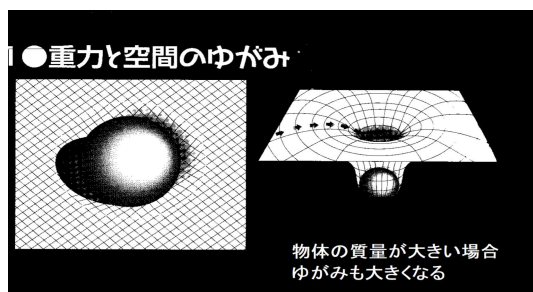
なお、「万有引力の法則の発見」を“重力の発見”と解釈してしまう例があるが、これは間違った解釈である。ニュートンは「リンゴに働く重力」を発見したわけではない。「リンゴに対して働いている力が、月や惑星にたいしても働いているのではないか」と着想したのである。ニュートンが行った変革はリンゴに働いた力が天の世界でも起きている、宇宙ならばどこにでもはたらいているという形で提示したことにある。ただ、重力が強く作用する場面などでは、ニュートン力学で説明できない現象が起きていた。何よりも重力の正体についてニュートン力学はなにも書き示す事ができなかった。20世紀初頭のアインシュタインの相対性理論の登場により、重力の正体が明ら



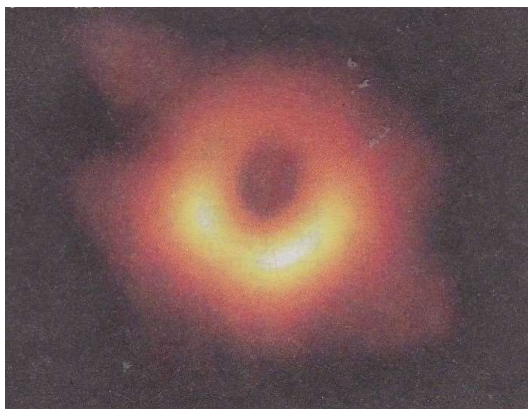
かにされたのである。結論を先に述べれば「重力は時空のゆがみ」と言える。

時間、空間を合わせた四次元時空を二次元の平面で表現すると、物体によって平面はくぼむようにゆがむ（第5図左）。質量が大きいほど時空の歪みは大きく深くなる（第5図右）。この歪みの領域に他の物体が近づけば、ゆがんだ重力場のため、歪みを作っている物体に近づくことになる。つまり、二つの物体の間に引力が働く。空間の歪みを作る物体の質量が増せば、派生したホールの深さも増し、ブラックホールとなる。

### 第5図 重力と空間のひずみ



第6図は最近（2019年4月）発表され、衆目を浴びたブラックホールの写真である。地球から約5500万光年はなれた銀河「M87」にある巨大ブラックホールの姿である。光すら飲み込んでしまうブラックホール、明るく輝くドーナツ状の光に囲まれた黒い穴、その巨大な姿の撮影に日米欧などの国際研究チームが初めて成功した。多くの謎を含む姿を詳しく調べることで、宇宙構造の成り立ち解明につながると期待されている。



第7図 ブラックホール

秩父146号(令和2年1月)

## 宇宙シリーズⅢ 膨張する宇宙② 宇宙の謎

岡本祥一 予科5-7  
(川口市) 航空16-4

### I. まえがき

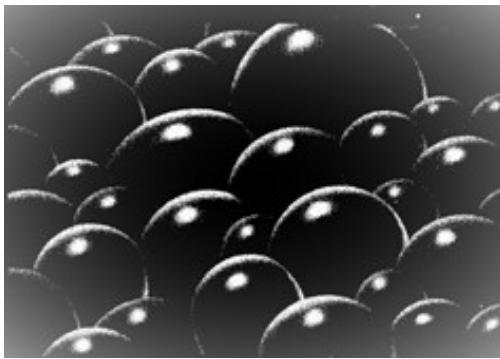
秩父前号（145号）記載の「宇宙シリーズⅡ」に引き続き、宇宙の構造及び現代宇宙論最大の謎、「宇宙に満ちている見えない何か」について紹介する。

### II. 宇宙の構造

銀河は数十個集まって銀河群を、100個から1,000個集まって銀河団を形成している。さらに、この銀河団が寄り集まって超銀河団となっている。これらの集団が宇宙全体でどのように分布しているのだろうか。宇宙全体の構造はどのようになっているのか。

1980年代、数億光年のかなたに、約2億光年にわたり銀河の存在を全く観測できない空っぽの空間が複数発見された。このような巨大空間は「超空洞」、あるいは

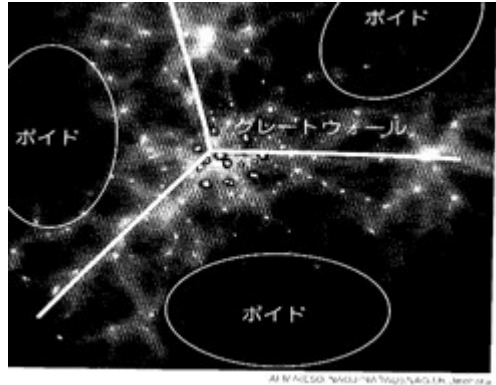
「ボイド」と呼ばれている。宇宙では銀河の分布は一様ではなく、銀河が有る場所と無い場所に分かれていることが明らかになった。そして銀河は線状に、あるいは面状に分布しており、「ボイド」と入り組んで広がっている状況は「シャボン玉」の「泡」の様子に似ている。それ故、宇宙全体の組織は「泡構造」と呼ばれている。石鹸水にストローを入れて息を吹き込むと、ブクブクと泡が盛り上がり、シャボン玉が沢山くっついた状態となっている（第1図）。



第1図 泡の分布状況

空気で満たされた泡の中が「ボイド」に対応し、泡の膜の部分が銀河の分布している場所に対応する。

1989年、スミソニアン物理学センターのマーガレット・ゲラーとジョン・ハクラは地球から約2億光年離れたところに、無数の銀河で造られた巨大な面状もしくは「壁」の様な組織があることを見いだした。長さ約5億光年、幅約3億光年の膨大な組織で、「万里の長城」に因んで「グレートウォール」と呼ばれている。



第2図 「グレートウォール」と「ボイド」

第2図に「グレートウォール」と「ボイド」が分布している模式図を示す。上述のように、宇宙の大規模構造として巨大な泡状の構造が見られ、「グレートウォール」は巨大な泡の膜面に相当するといわれている。

石鹸水から造られた泡を見ると、泡と泡が接触しているところには面があり、また面が3つ交わる所には線がある。さらに線が4つ交わる所には点がある（第1図参照）。

宇宙の泡構造においても同様に、銀河が面状や線状に分布している場所が見られ、シート型構造、フィラメント構造などと呼ばれている。また、面や線が交わる「点」に対応する場所は銀河が特に多く密集する場所になっており、大きめの銀河団や超銀河団の分布に対応している。

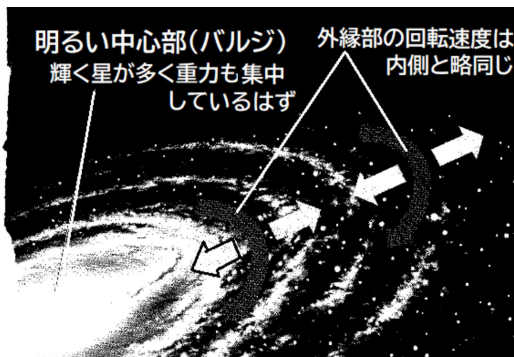
### Ⅲ. 宇宙の謎

夜空に輝く満天の星。1900年代初期の頃までは、宇宙の主役であり、星と星の間は空っぽの空間であると考えられてた。しかし、近年の天文観測により、望遠鏡を使って見える星などの原子から成る物質は僅かに4.6%で宇宙の脇役に過ぎないこと、そして空っぽと考えられていた空間には「見えない何か」が分布しているとされ、その「見えない何か」は謎の宇宙の構

成要素として「ダークマター（暗黒物質）」23%、「ダークエネルギー（暗黒エネルギー）」72%と推定されている。（ここでは普通の物質やダークマターの質量をエネルギーに換算してそれぞれの割合を比較している。エネルギーと質量は、 $E=mc^2$ の関係から等価であり、単位は相互に変換可能である。ここに、E：エネルギー、m：質量、c：光速）

#### IV. ダークマター

渦巻き銀河は、恒星が集中している場所を中心に数億年かけて回転している。この回転速度を調べたところ、中心に近い場所も外縁付近も回転速度がほとんど変わらない奇妙な事実が明らかになった（第3図）。なぜ奇妙なのか。

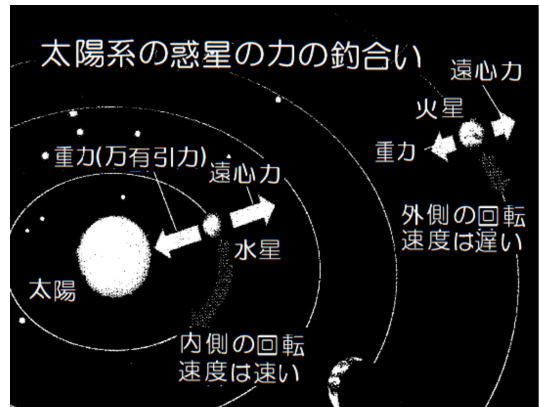


第3図 ダークマターによる重力の異常 (国立天文台, 2018年)

太陽系の惑星も、太陽に引っ張られる重力と遠心力が釣り合って太陽を中心に回転している。太陽の重力は遠くなるほど弱くなるので、太陽から離れる程遠心力も弱くなり、そのため外側の惑星ほど回転速度は遅くなる（第4図）。

渦巻銀河は中心に恒星が集中している。太陽が中心を占め強力な重力源である太陽系と似ている。それ故太陽系と同様に、銀河でも中心から遠いほど渦巻きの回転速度は遅くなりそうである。しかしそのようにはなっておらず、回転速度は中心近くの回

転速度と同程度となっている。



第4図 太陽系の惑星の力の釣り合い

この奇妙な現象を説明するには「見えない重力」（何か見えないものから生じる重力）が銀河全体を覆っているのではないかと考え、「ダークマター」としてその効果を計算に入れると回転速度の奇妙な現象をうまく説明できると言うのである。

銀河団の観測でも「見えない重力」の存在が示唆されている。銀河団を構成する個々の銀河は銀河団の中でさまざまな方向に勢いよく運動している。銀河団がまとまりを保つには、目に見える銀河相互に引っ張り合う重力（万有引力）だけでは不十分と推定される。結局、銀河団を「見えない重力」が覆い、その重力が加わり、ばらばらにならないとすれば説明がつく。これらの観測結果から宇宙には「ダークマター」と呼ばれている「見えない、謎の重力源」が存在すると考えられている。謎の重力の解明に懸命の努力が続けられているが、その正体はまだ分かっていない。ただ、未発見の素粒子ではないかと言われている。

これまでの観測結果などから「ダークマター」が満たすべき主な特徴を次に示す。これらの特徴を全て満たす粒子が見つければそれが「ダークマター」の正体である。

##### 1. 見えない（電磁波をださない）

全ての電磁波（マイクロ波、赤外線、可視光、紫外線、X線、 $\gamma$ 線）でも観測でき

ない。

## 2. 普通の物質をすり抜ける。

電気を帯びていないため、普通の物質とは相互作用をしない。そこに物質が存在しないようにすり抜ける。

## 3. 質量を持つ：周囲に重力をおよぼす。

ダークマター1個の質量は陽子の100～1000倍との説が有力視されている。

ダークマターを検出しようとする実験が世界中で行われている。日本でも大規模な実験が行われている。岐阜県の神岡鉱山内の地下1 kmに設置されている「XMASS」である。「ダークマター」は重力以外に、「弱い力」と呼ばれる種類の力を介してごく稀に普通の物質と衝突すると考えられている。その衝突の際に出るかすかな光を検出しようとするのである。「XMASS」は2010年の観測開始後、検出器の改良を一度行い、2013年に再開した。

「ダークマター」の正体は、「XMASS」を含めて世界中のどの研究機関でもまだ明らかにされていない。

## V. ダークエネルギー

「ダークマター」以上に不思議な「見えないなにか」が宇宙に満ちている事が、近年分かってきた。

最近までは宇宙膨張の速度は、徐々に遅くなっているはずであるとされてきた。銀河間の万有引力や「ダークマター」による重力が”ブレーキ役”となり、宇宙膨張を減速させる方向（収縮させる方向）に作用すると考えられていたからである。

ところが、1998年、遠い宇宙にある「Ia型超新星」の観測から、宇宙膨張の速度は予想とは反対に速くなってきている、つまり加速されていることが分かった。この結果から宇宙空間には「ダークエネルギー（暗黒エネルギー）」という未知のエネルギーが一様に満ちており、そのエネルギーが膨張する宇宙の”アクセル役”を果たしていると想定されている。

「ダークマター」は見えないとはいえ、普通の物質と同じように周囲に重力を及ぼし、宇宙空間に不均一に分布している未発見の粒子と考えられている。

一方、「ダークエネルギー」は宇宙空間に均一に満ちているのではないかと、そして宇宙の中のある領域から「ダークマター」の粒子を含む全ての物質を取り除いて「真空」にしても、「ダークエネルギー」はまだその空間に満ちているのではないかと推定されている。それ故、何とも奇妙な話であるが、「ダークエネルギー」は空間（真空）自体が持つ性質のようであり、宇宙が膨張しても”薄まらない”と考えられている。当然その正体は不明で、現代科学の最大級の難問になっている。

## VI. ノーベル賞

2019年10月8日、今年のノーベル物理学賞は「宇宙の進化と宇宙における地球の位置での理解への貢献」で、欧米の研究者3人が受賞した。

米プリンストン大学のジェームズ・ピーブルズ名誉教授は宇宙の歴史を解明する理論面で大きな貢献をした。代表的な成果は、宇宙の全方向からほぼ均等に届く「宇宙マイクロ波背景放射」と呼ばれる電磁波が宇宙の誕生直後に起きた「ビッグバン」の名残である証拠を理論的に証明したことである。宇宙の始まりから銀河などが生まれる過程を研究し、また宇宙の95%を「ダークマター」や「ダークエネルギー」などの未知の物質やエネルギーが占めていると考える現代の宇宙論の基礎を開いた先駆者の一人でもある。

スイスジュネーブ大学名誉教授ミシェル・マイヨール名誉教授と同大学デイエ・ケロー教授は、太陽以外の恒星を回る太陽系外惑星を1995年に初めて発見した。地球から約50光年離れた恒星「ペガス座51番星」の周囲を回る惑星である。この発見を突破口に、現在までに4,000個

を超える太陽系外惑星が見つかった。

初めて見つかった太陽系外惑星は、それまでの常識を覆すものであった。公転周期4日と恒星に極く近い軌道を、木星の半分ほどの大きさのガスでできた巨大惑星が回っていた。太陽系では、木星のようにガスでできている惑星は太陽からかなり離れている軌道を公転している。太陽系と大きく構造が異なる惑星の発見は、それまでの太陽系や惑星の生まれる過程についての考え方を見直す結果となっている。

## Ⅶ. あとがき

見渡す限りの宇宙には、およそ1000億個の銀河が散らばっていると見積もられている。その一員としての天の川銀河には、1000億～数千億の恒星が分布し、その一つの恒星として太陽系があり、太陽の惑星として我が地球がある。地球はこのように宇宙の一員として極めて稀な存在であり、その地球に住む我ら人類も宇宙的には極めて稀なそして貴重な存在である。「さざれ石の巖となりて苔のむすまで」一層の繁栄を願い擱筆する。 2019年11月  
初旬脱稿