

## まえがき

NASAの探査機ボイジャーが太陽系圏から脱出したというニュースが二〇一二年の夏に流れました。ボイジャーは、三十五年もの長旅の末に、ついに太陽系から出ていわゆる恒星間空間へと旅だっていきました。地球からの距離がおよそ一八八億kmにもなります。土星・天王星・海王星といった、これまであまり接近できなかった惑星の撮影を果たした後で、これからは太陽系の外の星々の世界を、宇宙の知的生命体へのメッセージを携えてどのように旅をしていくのでしょうか。

火星に移住！ 宇宙空間に巨大な居住区を建設！ 長時間の宇宙旅行を身近なものに！ といった、荒唐無稽とも思える夢のような話題を最近耳にすることがあります。これまで、単にSFのうたえでの話だったものが、最近の目覚ましい宇宙技術の発展の影響で、ある程度の技術の裏付けを伴って構想されており、なかなか良く考えられていると感心させられます。また、これらの構想ではよく、従来の技術の組み合わせで実現可能とか、新しく開発が必要になる重要な技術はほとんどない、というように説明されます。人びとに、安心感や信頼感を持ってもらうのには良いのですが、実現するためには、まだ解決しなければならない課題があるだろうと、現実的に思っています。しかし、行けたらいいなと思いますし、いつかそういう時代が来ることは願っています。

願っていても仕方がないので、少しは何か役に立たないだろうかと考えました。いきなり、宇宙への移住や旅行では、少し飛躍が大きすぎるので、まず最初のステップとして、移住や旅行のための準備をはじめることしましょう。

地球外でこれまで人類が足跡を残したのは月だけです。月は地球に近いし行っても帰りやすい数少ない天体なので、移住というよりも旅行のように行き来をする対象に向いています。月には大気がなく、小さな隕石でも落下してくるため、月面での有人活動は危険を伴います。そこで、安全に待機できるシュルターが必要なのですが、それを月面上に作るには多くの困難を伴います。しかし、月には火山活動でできた、富士山の麓の樹海にある風穴のようなトンネル（溶岩チューブ）があるらしいということが月周回衛星「かぐや」（SELENE）による観測画像からわかり（文献[1]）、それが有人活動の際の拠点に使えるかもしれないと言われています。

このようなことから、まずは月で有人探査が安全に行えるように、無人での下準備が必要になります。火星も移住する前に無人での調査を数多くやる必要があるでしょう。こうして、月や火星へ探査に必要なものを運ぶのに使用するロケットは、荷物室のサイズがほぼ四・六m×一六mと決まっています。また、輸送運賃は荷物の質量・嵩（体積）と目的地でほぼ決まり、非常に高額なものです。つまり、荷物は軽量でなるべくコンパクトに収めることが求められるのです。このことから、さまざまな場面で超軽量な展開構造物を実現する技術が必要になってきます。地球の

周回軌道や静止軌道に打ち上げる人工衛星でも、ロケットの荷物室に入れて運ばないといけないので、衛星搭載用アンテナや太陽電池アレーなどを対象に同様な展開構造技術が必要です。これらは、長い研究開発の歴史があり、メカニズムを使った展開構造物に加えて、シンプルな膜構造技術や袋状の畳まれた構造体に気体を導入して膨らませて形成する膨張膜構造（宇宙インフレーター構造）技術の研究開発が、最近では広く行われるようになりました。目的とする対象物は違っても、超軽量ということと折り畳めるということ、この二つがこれからの宇宙利用を活性化させるキーテクノロジーになります。

もう一つこの技術の興味深いところがあります。これまでの、宇宙展開構造物が、そのプロトタイプモデル（研究段階で製作する試作品）でも、自分たちで手作りをすることが難しく、加工技術や製造技術を持っている企業の協力で開発が行われていました。しかし、この宇宙インフレーター構造技術なら、自分たちで作ることができます。最初は、いくつかの大学との共同研究の中で大學生が作りましたし、今でも私の研究室では學生が作っています。いっしょに開発するパートナーも、宇宙関連のベンチャー企業が中心になり、優秀な若いエンジニアや研究者の熱心な取り組みが功を奏して、二〇一二年にはついに国際宇宙ステーションでの実験にまで漕ぎ着けるまでになりました（文献[2]）。研究の初期段階を、このような大学やベンチャー企業が中心になって、未来をつくる若い人たちの参加を得てできるのは、これまでの宇宙構造の研究にはあまり無いことで、そこ

にこの技術の将来性を見出しました。

この本は、大形宇宙構造・膜構造・宇宙インフレーション構造に関する技術の解説と、それぞれの国内外の研究開発の紹介が中心ですが、最先端科学技術は、研究開発に莫大な費用がつきもので、当然「なんのために」ということに対して一般のかたがたに理解されるような説明が必要になります。むしろ、そこがスタートラインになって、そこからどんな最先端科学技術が必要になるのかを、われわれ研究者やエンジニアも認識していかないといけないでしょう。よく言われることですが、できることをやるのではなく、やらなければならないことをやる、この自覚が未来の技術開発においても大切だと思います。この本で取り上げるものは、将来、宇宙利用が促進されていくと必ず必要になる、まさに未来の宇宙利用のためのインフラストラクチャ (infrastructure) としての、しかし開発にある程度の時間がかかるキーテクノロジーとしてのインフレーションストラクチャ (inflatable structure) です。若い人たちにも是非、このような分野の研究開発に参加をして欲しいと思います。また、多くのかたがたに、宇宙構造技術に対する理解を深めていただき、これらの先にある新しい宇宙の利用方法の提案をして欲しいと思います。

本書をより良くするために、コロナ社から多くの貴重なアドバイスをいただきました。読者の視点を想定した楽しいやりとりの中で書き進めることができましたことに、深くお礼を申し上げます。

二〇一五年四月

角田 博明

もくじ

1 宇宙の中の地球を考える

地球の未来は宇宙にある 1

宇宙に生命を求めて 4

宇宙での生活 7

2 宇宙を「視る」こと、宇宙から「観る」こと

望遠鏡で視えるようになった宇宙 10

地球から天体を視る 12

宇宙から宇宙を観る 15

宇宙から地球を観る 18

### 3 宇宙利用の目的と手段

「目的」と「手段」を意識しよう 22

新しくて意義のある「目的」 24

宇宙開発と宇宙利用 ——「目的」の変遷 26

人工衛星の「目的」と「手段」 ——ミッション系とバス系

28

「手段」を手に入れるのには時間がかかる 32

### 4 性能と機能

性能と機能の関係 36

機能の背後に隠された性能 ——携帯端末を例に 36

性能の向上に間接的に貢献する機能 ——クルマを例に 38

性能向上に直接貢献する機能 ——デジタルカメラを例に 39

宇宙構造物の性能と機能 41

大きければ大きいほど高性能 ——アンテナ 42

打ち上げコストと収納スペースは無視できない 44

## 5 大形化が求められる宇宙構造

電波を中継する静止通信衛星 48

地球をくまなく観察するための地球観測衛星 53

宇宙を知るための人工衛星と宇宙探査機 55

太陽エネルギーを使うための宇宙太陽光発電システム 58

コラム2 宙に浮かんでみえるテンセグリティ構造 62

## 6 軽くて折り畳める宇宙構造

月や火星の探査のために 64

設計条件は緩すぎず厳しすぎず 66

本当に宇宙で使えるか —— 宇宙実験での技術実証 67

## 宇宙に開く展開構造物

- かたい構造物、やわらかな構造物 69
- ヒンジやメカニズムを使った構造物 69
- 膜材料の活用 72
- 宇宙インフレータブル構造の登場 75
- ふわりと開くメッシュ反射鏡アンテナ 77
- メッシュ反射鏡アンテナを搭載した人工衛星 77
- どのようなメッシュ材料が使われているのか 79
- メッシュ反射鏡アンテナはどのように展開するのか 81
- 膨らませてアンテナに —— 宇宙インフレータブル構造 83
- エコー衛星 85
- 集光鏡 87
- パラボラアンテナの反射鏡 88
- コラム3** インテリアにもなる金箔アンテナ 90
- インフレータブルチューブでアンテナをまっすぐ伸ばす 91
- スピン軸方向にアンテナを伸ばす 91



インフレータブル式アクチュエータ	92
インフレータブルチューブで支持した膜面による平面構造物	96
宇宙で日傘を広げる	97
太陽の光を推進力に —— ソーラーセイル	99
太陽電池アレー	100
柔軟に曲げられる太陽電池	100
人工衛星用の太陽電池アレー	102
平面アンテナ —— 合成開口レーダー	103
月や火星で探査ローバーを走らせる	105
着地時の衝撃を吸収するエアバッグ	105
月や火星を走るためのホイール	107
エアバッグの機能をあわせもつホイール	109
和紙で作ったホイール	111
火星探査用飛行機の小さく折り畳めるウイング	113
長い歴史がある折り畳み式ウイング	113
膜材でウイングをつくる	115
高い収納性と超軽量なウイングを目指して	117

インフレータブル構造のさまざまな用途への展開 118

宇宙での活動のための居住スペース 118

大気圏突入のための減速機 120

コラム4 ごぼう袋でつくる簡易インフレータブル飛行機 122

## 8 宇宙構造物で使える便利な「膜」

部材への力のかかり方 124

曲がりにくい「かたち」を作る 126

膨らませて「かたち」を作る 129

宇宙インフレータブル構造 129

作りやすいかたち 130

なにを入れて膨らませるか 131

## 9 使いやすいインフレータブルチューブ

インフレータブルチューブとは 132

インフレータブルチューブの展開 133

展開したインフレータブルチューブの形状維持

134

コラム5

昆虫の羽化を凌ぐのは難しいけど、パイなら誰でもつくれる

140

## 10 ミッションを成功へ導くために

展開の不具合

142

宇宙へ持っていくものは特注品ばかり

143

予備系で信頼性を高める

144

部品数を減らして信頼性を高める

146

あとがき

参考文献

索引

160 152 149

【提供・出典の記載がない写真は著者撮影】

# 1 宇宙の中の地球を考える

## 地球の未来は宇宙にある

地球が人類にとって生存可能な環境であり続けるのは、あとのかなりの期間なのでしょう。太陽の寿命といわれている五十億年後はともかくとして、差し迫った課題の一つはエネルギー問題です。なかでも、太陽エネルギーは、太陽から照射される光や熱を直接的に利用するので、再生可能エネルギーとして最も注目を集めているエネルギーです。

有名な建築家・思想家のバックミンスター・フラードは、一九六三年に『宇宙船地球号操縦マニュアル (Operating Manual for Spaceship Earth)』で、現在の限りある化石燃料を使いながら、太陽光を有効に使うための技術開発の必要性を述べています (文献[3])。そこでフラードは、地球をクル

マに置き換えて、化石燃料をクルマのバッテリーに、太陽光などの自然エネルギーをクルマのエンジンに例えています。つまり、クルマはバッテリーがなくては始動できないが、エンジンが始動してしまえばバッテリーがなくても動き続けるというものです（もともと、いまのクルマは電子制御に依存しているので、動きはじめてもバッテリーが必要です）。現代社会とは、バッテリーだけで走り続けるクルマのようなもので、バッテリーがあがる前にエンジンを始動しなければならぬ、という現実的な解釈には説得力があります。長い未来にわたって安定的に使い続けられるエネルギーは、太陽から照射される光（電磁波）しかなく、太陽エネルギーを利用するための技術開発を、化石燃料がないと回っていかない現代社会の中で進めることは、時代とともに重要性を増していきます。

本書では、地球近辺の宇宙での人類の活動だけでなく、月や惑星で人類が活動するような未来までを想定しています。地球の周回軌道での長期間の滞在をすでに実現した人類が、つぎに目指すのは、月や火星などの衛星や惑星の利用でしょう。このような宇宙における有人活動でも、基本的にはやはり太陽エネルギーです。

太陽電池の原料となるシリコン（Si）は月に豊富にあるので、地球で作った太陽電池を高い輸送コストをかけて運ぶよりも、月に工場を建ててそこで作ったほうが得策です。また、地球の周回軌道に送り込む人工衛星やほかの惑星の探査のための出発基地としても、重力が地球の六分の一であ

## 1 宇宙の中の地球を考える

る月を使えば燃料が少なくてすみます。さらに、月には地球上にはほとんど存在していないヘリウム<sup>3</sup> ( $^3\text{He}$ ) が大量に存在することがわかっています。これは、太陽の活動で生み出されたものが、太陽風として大気がない月に到達し、月の砂の中に吸着されて保存されたものです。これを利用すれば、核融合によりエネルギーを効率良く取り出すことができます。

すでにNASAの惑星探査機や火星探査ローバーなどで使われている原子力電池の利用もありますが、それでも長期間にわたり安全かつ安定的に電力を得るには、太陽エネルギーを基本にすることは重要です。太陽系の一員である地球に暮らし、また、ほかの惑星に出掛けていっても、地球をつねに大切な故郷とするであろう人類にとって、未来はつねに太陽とともにあることを再認識したいと思います。

地球の環境問題の一つに、レアメタルと呼ばれる埋蔵量がきわめて少ない資源（希少金属）の枯渇があります。これらは、地球上に偏在しており、その安定供給が課題です。しかし、太陽系の中で、例えば白金（Pt）が豊富にあることが予想されている小惑星から白金を入手できれば、地球の資源問題の解決に結びつきます。地球は重力が大きいために、資源によっては地中深くに埋蔵されているものもあり、穴を掘ってそれを採掘するのと、採掘用の宇宙機でほかの惑星に採掘に行くのとでは、どちらのコストが低いのかという議論になりそうです。いずれも非常に大きなコストが予想されますが、宇宙を利用する場合の手段でも、ほかの用途でも使えるように汎用的なものを

目指せば、その分コストダウンの可能性が高くできるという見方もできます。

## 宇宙に生命を求めて

約四十五〜四十六億年前に太陽系が形づくられ、地球がうまれました。そして、約四十億年前に地球に海ができ、それが生命の誕生へとつながりました。生命の存在に水は欠かせません。また、惑星探査の結果から、かつて水が存在した痕跡を発見したり、あるいは氷として蓄積されている可能性を見出す中から、地球以外にも生命が誕生した可能性が指摘されています。

しかし、生命の起源からバクテリアまでの道のりも、また、そこから光合成をする生物へと進化する、さらに海水中で生活をする生物から陸上で暮らす生物にまで進化した過程も、進化に必要な環境やさまざまな条件が適切な時系列で地球上に準備されたことで実現しました。同じような環境ということだけであれば、地球以外にも存在した（または存在している）可能性はあります。実際に、近年になって太陽系以外にあるいくつかの惑星で、恒星からの距離や温度環境が地球に似ているという発見がなされています。

また、生命にとって不可欠な水の存在の可能性が指摘されています。これらは地球から数十から数百光年も離れているため、望遠鏡による観測しか手段がなく、地球に似た環境というだけで

が、そこになんらかの生命の存在を期待したいのが人類の偽らざる気持ちでしょう。未知への探求心が地球上の生命の進化の原動力ならば、その探求心の先に、いずれ地球外生命の発見の日がくるかもしれません。またそれが、単細胞の生命ということであれば、意外にその日は早いかもしれません。

人類は、さまざまな技術を手にし、高度な文明を築きあげた知的生命体です。言葉や文字を生みだしただけでなく、それを記録できるように、紙やレコードを発明しました。また、情報を離れたところに伝達したり、直接に会わなくても意志の疎通が図れるように、通信を発明しました。さらに、人や物体を長い距離でも容易に移動させることができるように、各種の交通手段を発明しました。そして現代はこれらを、地球上だけでなく宇宙空間にも広げることに進んでいます。これは、地球外知的生命体が存在しているとしたら、発見するのに、あるいは発見されるのに有利な方向に働きます。

こうして、NASAは、一九七二年〜一九七三年に打ち上げた惑星探査機パイオニア10号と11号では図形を描いた銘板を、一九七七年に打ち上げた宇宙探査機ボイジャーではレコード盤を、探査機に取り付け、地球外知的生命体にメッセージを伝えようしました。写真1は、このボイジャーに搭載したゴールデンレコードです。レコードには、自然界の音や音楽のほかに、画像や言語やメッセージ文などが記録されており、地球に人間が築いた文明があることを知らせようとしています。



す。このレコードは、アナログレコードなので、知的生命体であればジャケットの絵を見ながら記録を読み出すことができるだろうと考えられました。地球外に生命があっても、それが知的生命体でなければ発見してもらえないということを前提にした試みです。

銀河系に存在する地球外生命の分布を推定する方程式に、有名なドレイクの式があります。一九六一年に米国の天文学者であるフランク・ドレイクによって考案されました。この式では、人類と接触する可能性がある地球外文明の数を推測するために、地球外文明が星間通信をする割合と文明の存続期間を必要とします。つまり、星間通信の手段を持たなければ発見のしようもないわけで、そのための科学技術の発展が必要です。また、文明の存続も重要で、通信に要する時間（数百年のオーダー）を考えると、地球外知的生命体に地球を発見してもらったときには、すでに地球文明は滅んでいた、などということもありえます。われわれが平和で持続可能な地球を少しでも長く維持することが、地球外知的生命体に出会える確率を高くすることにもなります。宇宙人に出会いたいというのは、平和な地球を維持するとい



写真1 地球外文明へのメッセージ [©NASA]

うことが必然となるので、科学的に裏付けられた夢ということが出来るかもしれません。

## 宇宙での生活

宇宙は過酷な環境で、地球は快適なオアシスだというのは、そういう環境で進化してきた人間による解釈です。そのような人間が、地球とは確実に異なる環境である地球以外の惑星で生活をしていくのは、多くの困難を伴うことだと思います。しかし、地球に似た生態系を作れば、その中で暮らしていくことができそうです。このような生態系をテラリウムと呼びます。惑星をまるごと環境改造してテラリウムにするというのも考えられていますが、もっと狭い閉鎖環境の中でなら作れることはそれほど困難ではありません。一九九一年から二年間にわたって、米国でバイオスフィア2という一・二七haもの建物で地球上に閉鎖空間を作り、その中で実際に八人の人間が生活をするという実験が行われました。循環型の社会を人工的に作るということに対する数多くの知見が、この実験から得られました。

宇宙で人間を生活させるのはハードルが高いので、現時点では植物や魚などの小さな生物を生育させる実験が行われています。生存に必要な酸素を生み出す植物と、光合成に必要な紫外線の照射、それと水と適切な温度環境があればその中で生命を育てることができます。排泄物はいせつは、環境を

悪化させる方向に働きますが、それを植物の生育の養分に使えば有効利用が可能です。こうして、地球上で行われている生命の営みと同じことが、テラリウムという限られた閉鎖空間の中で実現されています。国際宇宙ステーションでは、一人の宇宙飛行士により二百日以上以上の滞在が行われてきました。ロシアのミール宇宙船では四百日以上最長記録を達成しています。しかし、長期間の滞在は、生命の維持だけでなく、身体機能や精神面への影響が指摘されており、まだ解決しなければならぬ問題があります。地球は人類にとって最適な生命維持装置であり、これに匹敵するものを人工的に作り出そうとすると、とても大掛かりなシステムが必要になります。

宇宙で人間が活動する際には、まず安全性が確保でき、生存できる環境を内部に作り出すシェルターのようなものがが必要です。このシェルターの壁面は、宇宙からの放射線を遮り、また、隕石の衝突から防御する機能が必要です。さらに、内部の温度や圧力を適切に保つことも必要です。ここで、問題になるのが圧力です。地球は大気があるためにほぼ一気圧（一、〇一三hPa）の圧力がつねにかかっています。しかし、例えば火星表面の大気圧は平均で約七五〇Paと非常に低いことがわかっており、さらに大気の組成のほとんどは二酸化炭素です。月にいたっては大気がなく、ほぼ真空状態です。このために、人間の生存に必要なほぼ一気圧の圧力をシェルター内に作り出す必要があります。

このシェルターの壁面を、本書で扱う膜構造や宇宙インフレーターダブル構造で作ることも研究され

# 索引

## 【あ】

アクティブ・フェーズド・アレー・アンテナ	60
アーサー・C・クラーク	48
圧縮部材	126
アドバルーン	129
アポジキックモータ	45
編み物	81
アルミニウム蒸着ポリエステルフィルム	85
安息香酸	131
アンテナ	42
アンテナ反射鏡	30

## 【い】

イオンエンジン	56, 87
イカロス	56
一体成形	110
移動体衛星通信	51
イリジウム	145
インフレータブルウィング	115, 117
インフレータブル構造	84, 129
インフレータブル式アクチュエータ	68, 93
インフレータブル伸展マスト	93
インフレータブルチューブ	88, 92, 96, 100, 117, 132
インフレータブル反射鏡	88

## 【う】

ヴァン・アレン帯	53
ウィング	66, 113
宇宙インフレータブル構造	68, 75, 129
宇宙エレベーター	61, 143

宇宙開発	26
宇宙開発事業団	26
宇宙機	28
宇宙航空研究開発機構	26
宇宙構造物	41
宇宙ステーション補給機	94
宇宙船地球号操縦マニュアル	1
宇宙太陽光発電システム	59, 87
宇宙展開構造物	47
ウレタン樹脂	134

## 【え】

エアサポート構造	129
エアバッグ	106, 109
エアロシェル	106
液体メタン	109
エクスプローラー1号	49
エコ衛星	85
円環	76, 88

## 【お】

大形展開構造物	32
オポチュニティ	106
折り紙	74
折り畳み傘	81
折り畳み構造物	71
折り畳み式骨組み構造	81
織物	81

## 【か】

回転放物面	44
角環	76
火星	64, 113
火星飛行機	113

索 引

火星有人計画	32
紙 漉	111
紙飛行機	112
ガラス転移点温度	138
ガリレオ・ガリレイ	10
観測衛星	67

【き】

気 球	68
きく8号	51, 77
気候変動観測衛星	20
技術試験衛星	68
技術試験衛星Ⅷ型	51, 77
気象衛星	28, 52
きずな	28
きぼう	94
気密層	136
給電部	51
鏡面精度	56, 80
金属蒸着フィルム	73, 85, 88
金属メッシュ	77, 80
金めっき	80

【く】

空間構造	41
空気膜構造	129
グッドイヤー社	114

【け】

軽量化	46, 55
ケーブル材料	75, 125
ケーブルテントトラス構造	77
ケーブルネットワーク	78, 82
原子状酸素	55, 67
原子力電池	3
減速機	106, 121

【こ】

ゴ ア	81, 110
硬 化	76, 134
光学カメラ	18

光学観測	53
光学望遠鏡	11, 12
硬化層	136
高強度繊維	107
高収納効率化	55
合成開口レーダー	18, 54, 96, 103
こうのとりの	94
小型衛星	68
小型ソーラー電力セイル実証機	56, 99
小形ローバー	65, 67, 145
国際宇宙ステーション	8, 16, 68, 120
国立天文台	14
コスト	64, 143
固定衛星通信	50
ゴールデンレコード	5

【さ】

座 屈	86
サンシェード	56, 96, 97
サンドイッチ構造	72

【し】

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡	17, 56, 97
紫外線	136
紫外線硬化型樹脂	136
紫外線発光ダイオード	136
磁気圏尾部観測衛星	91
色素増感太陽電池	100
支持構造物	41, 71
シャボン玉	86
周回衛星	18
集光鏡	60, 87
柔軟エアロシェル	121
収納効率	42, 46, 101
収納寸法	71
周波数	42
受信アンテナ	43
寿 命	147
準天頂衛星	52
昇華型パウダー	131

樟 脳	131	太陽同期軌道	44
人工衛星	48	太陽熱推進機	87
伸展マスト	68, 78	多層断熱材	73
		タワー構造物	71
<b>【す】</b>		探査機	28
推進機	99	探査ローパー	108
すばる	14	炭素繊維強化プラスチック	72, 124
スピリット	106		
スピ安定型衛星	91	<b>【ち】</b>	
スプートニク 1 号	49, 69	地球観測衛星	28, 53
スペースシャトル	16, 68	地球資源衛星	54
スペースデブリ	120	地球磁場	11
スペース VLBI	17, 55, 79	地球周回軌道	53
		知的生命体	5
<b>【せ】</b>		超小形ローパー	108
星間通信	6	超長基線電波干渉計	17
静止衛星	48	張力材料	125
静止軌道	48, 53		
静止通信衛星	67	<b>【つ】</b>	
静止トランスファー軌道	44	通信衛星	28
脆性破壊	139	通信放送衛星	25, 71
セイル	56	月	10, 64
赤外線望遠鏡	13		
赤外輻射率	97	<b>【て】</b>	
セルロース	113	デオービット膜	74
		データ中継衛星	49, 52
<b>【そ】</b>		テラリウム	7
測地衛星	28	テレスコピック	70, 127
ソジャーナ	106	展開信頼性	42
塑性変形	138	電磁波	13, 42
ソーラーシェード	96	天体観測	12
ソーラーセイル	56, 74, 75, 99	天体望遠鏡	10
		電波天文観測衛星	77
<b>【た】</b>		電波反射体	85
タイタン	109	電波望遠鏡	11, 13
だいち 2 号	19	導電材料	80
太陽エネルギー	1		
太陽系	4	<b>【と】</b>	
太陽光発電	58	土 星	109
太陽電池	57, 87, 100	ドーム式競技場	125, 129
太陽電池アレー	30, 70, 96, 102	ドライアイス	131

索 引

トランスハブ	118	フレーム構造	76
トリコット編み	80		
ドレイクの式	6		
		<b>【へ】</b>	
<b>【に】</b>		平面アンテナ	54, 96, 103
日本実験棟 JEM	94	平和利用	27
		ヘリウム 3	3
<b>【ね】</b>			
熱可塑性樹脂	138	<b>【ほ】</b>	
熱硬化型樹脂	136	ボイジャー	5
熱シールド	121	ホイール	66, 110
熱電変換素子	87	望遠鏡	4
		放射線帯	53
<b>【は】</b>		放射素子	103
バイオスフィア 2	7	棒状アンテナ	49
バクテリア	4	放送衛星	28
バックミンスター・フラー	1	膨張膜構造	84, 129
ハッブル宇宙望遠鏡	15	ポリアミド 66	138
ハニカムサンドイッチ構造	72	ポリイミドフィルム	57, 102, 117, 133
跳ね上げ式反射鏡	50	ポリオレフィンフィルム	93
跳ね上げ方式	46		
パラシュート	74, 120	<b>【ま】</b>	
パラボラアンテナ	43, 88	マイクロ波	54, 59
はるか	17, 55, 77	膜構造	73
反射鏡アンテナ	51	膜材料	74, 75, 125
		マーズ・エクスプロレーション・	
<b>【ひ】</b>		ローバー	106
日傘	97	マーズ・パスファインダー	105
飛行船	114, 129	マルチビーム衛星通信	78
微小重力環境実験	94		
ピーター・グレーザー	59	<b>【み】</b>	
ヒンジ	70, 81	ミウラ折り	74
		ミッション	28, 142
<b>【ふ】</b>		ミール宇宙船	8
フェアリング	45, 72		
フェーズドアレイ方式		<b>【む】</b>	
Lバンド合成開口レーダー	19	無人飛行機	65, 67, 146
複合材料	124		
輻射	97	<b>【め】</b>	
ふよう 1号	54	メッシュ反射鏡	17
フレキシブル太陽電池	100	メッシュ反射鏡アンテナ	55, 77
		メテオロイド	66, 120

	<b>【も】</b>		CFRP	72, 124
モリブデン		80	EarthCARE	20
	<b>【や】</b>		ESA	20
八木・宇田アンテナ		42	ETS-VIII	51, 77
	<b>【ゆ】</b>		Faster, Better, Cheaper	65
融点		138	FSC	50
輸送コスト		44, 64, 143	GCOM-C	20
	<b>【よ】</b>		GEOTAIL	91
翼型		117	GPS モジュール	37
予備系		142, 144	HALCA	17
	<b>【ら】</b>		HST	15
ラグランジュ点		17	HTV3	94
ランブシェード		111	IAE96	88
	<b>【り】</b>		IEM	93
陸域観測技術衛星		19	IKAROS	56, 75, 99, 100
立体紙漉		112	IRIDIUM	145
リフレクトアレー		104	ISAS	26
	<b>【れ】</b>		ISS	16
冷却硬化型樹脂		139	JAXA	26
レーザー		59	JERS-1	54
レンズ		36	JWST	17
	<b>【ろ】</b>		MLI	73
ロッドアンテナ		70, 127	MSC	51
ローパー		106	MUSES-B	17, 55, 77
ロボット		65	NAL	26
	<b>【わ】</b>		NASA	65
ワイヤーケーブル		126	NASDA	26
惑星探査機パイオニア		5	PALSAR	19
和紙		112	SAR	96, 104
	<b>【英字】</b>		SIMPLE	93
ALOS-2		19	Spartan	88
			SPINAR	92
			SPS	59
			SSPS	59
			UHF	42
			VHF	43
			VLBI	17
			WINDS	28
			X線天文衛星	13
			X線望遠鏡	13



未来を拓く宇宙展開構造物  
——伸ばす、広げる、膨らませる——

© Hiroaki Tsunoda 2015

2015年7月3日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 つの だ ひろ あき  
角 田 博 明  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-07711-7

(鈴木) (製本:愛千製本所)

Printed in Japan



Ⓜ <日本複製権センター委託出版物>

本書の全部または一部を無断で複写複製(コピー)することは、著作権法上での例外を除き、禁じられています。本書からの複写を希望される場合は、下記にご連絡下さい。  
日本複製権センター (03-3401-2382)

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします