

# 人工衛星・惑星探査機

のための

# 宇宙工学

竹ヶ原 春貴・佐原 宏典  
石井 信明・古本 政博 共著

コロナ社

# まえがき

本書は、大学の理工学系の学部初年度生、工業高等専門学校上級生、あるいは宇宙に興味を持っている高校生を念頭に執筆しました。20世紀中頃から始まり、70年にわたる人類の宇宙開発は、いま、地球まわりでは気象衛星やGPS衛星をはじめとするさまざまな分野で実用化の時代を迎え、一方、太陽系内の月や他の惑星・準惑星・衛星・小惑星・彗星などの探査や太陽系の生成や宇宙の誕生の謎を探るプロジェクトの実施、さらには人類の宇宙居住のための計画が検討されています。

宇宙開発にはじつに多岐にわたる学問が関連しています。すなわち、宇宙機の製造や、その打上げ、運用、さらに地球環境・気象観測・農漁業観測などの地球環境計測に関わる機械、電気電子、通信、誘導、制御などの工学分野や、太陽系の生成や宇宙の誕生の謎を探る宇宙探査・観測に関わる理学分野、打上げや軌道、地球まわりのスペースデブリに関する世界各国の取り決めに関わる法学分野、莫大な費用を伴う大型プロジェクトに関する経済学分野、宇宙環境の人体に与える影響を評価する医学分野なども関係してきます。

このようにさまざまな学問分野が関係する宇宙開発では、数々の分野の知識や経験を持った方々の協力の上に成り立っています。本書は、理工学分野に興味を持つ皆さんに、いま（これから）、何を、どう勉強していけばよいのか、何が必要とされているのかを示すことができればという思いで執筆しました。すなわち、地球まわりの実用分野においても、宇宙探査の分野においても、いま（これから）皆さんが勉強している（しようとしている）大学教養課程の数学・物理が、どのような形で宇宙開発につながっているのか、またそのためにはその前段階の高校数学・物理からどのように進展しているのかを理解することが重要です。

一方、詳細かつ実際的な検討を行うためにはより進んだ数学・物理や計算機

科学が必要になります。本書においては、宇宙に興味を持ってくださる皆さんに（たとえ、その分野が理学であれ、工学であれ、医学であれ…）皆さんの勉強している（しようとしている）数学・物理等々がどのように宇宙につながっているかを、気象衛星や観測衛星に代表される地球周回衛星や太陽系内の他の惑星、衛星等々を探索する宇宙探査機の地上からの打上げ、目標軌道への投入などを題材に紹介していきます。

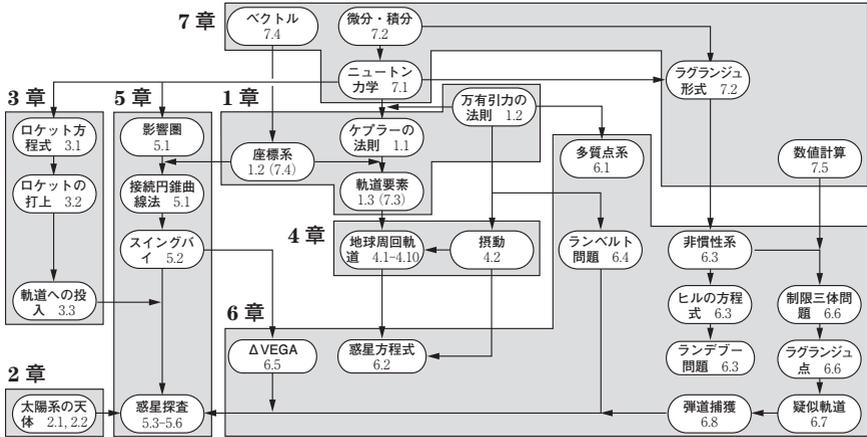
まず、本書の1章から6章までは、「宇宙航行の基礎と実例」ともいうべき内容で、人工衛星・宇宙探査機を打ち上げてから、予定の軌道に投入するまでを順を追って、その物理的意味を主眼に説明しています。一方、7章は「宇宙航行のための数学・物理」として、1章から6章までの定量的な基礎となる数学的・物理的裏付けを単なる公式集ではなく、物理現象を記述できる数学として紹介しています。また、より詳細な数学的裏付けはそれぞれの専門書を参考にしてください。

1章は万有引力が作用している物体（天体）に成り立つケプラーの法則に関し、法則の物理的意味とその証明を導いています。その結果、得られる天体の軌道である円錐曲線から、楕円軌道を中心に軌道を定義しています。2章は、実用・観測・探査の対象である地球をはじめとする太陽系内の恒星（太陽）、惑星、衛星、準惑星、小惑星（帯）、彗星、エッジワース・カイパーベルト天体やオールの雲など太陽系の天体の概要について述べ、いままでの研究開発成果や今後の予定などについて簡単に紹介しています。

3章は衛星、探査機を打ち上げるためのロケット推進の原理、その性能パラメータ、軌道投入に必要なとされる速度増分をどのように獲得するかを説明し、その後実際の打上げのシーケンスなどを、地球静止衛星を例に紹介します。4章では静止軌道などの地球周回衛星について、その軌道設計から各種軌道（太陽同期軌道、回帰軌道、準天頂軌道など）について記述しています。

5章では、これまでの軌道力学の実践的な応用として、月や惑星を目標天体として、打上げから目標天体を周回する軌道に投入するまでの軌道遷移手順と、それぞれの軌道を表現する際に鍵となるパラメータを示しています。6章では、1章で二体問題として求めたケプラー運動に対し、他天体の重力の影

響、さらに国際宇宙ステーションへの接近やフォーメーションフライトなどのランデブー問題や軌道遷移に関するランベルト問題などを取り扱っています。これらの各章の関係を図に示します。



本書の構成図

本書の構成は、天体運動の基礎、宇宙開発の現状から展望・計画までに関わる少し欲張りな内容となっていますが、その基礎となる数学・物理がどのように使われているかをご理解いただけるように留意しましたので、ご活用いただければ幸いです。

2024年4月

著者一同

**【執筆分担】**

- |                          |              |
|--------------------------|--------------|
| 竹ヶ原 春 貴 (元東京都立大学)        | 1, 2, 3, 7 章 |
| 佐 原 宏 典 (東京都立大学)         | 4, 6, 7 章    |
| 石 井 信 明 (元 JAXA 宇宙科学研究所) | 5 章          |
| 古 本 政 博 (株式会社 QPS 研究所)   | 6 章          |

(所属は 2024 年 4 月現在)

# 目 次

## 1. 衛星・探査機の運動, 軌道

1.1	ケプラーの法則	1
1.1.1	ケプラーの法則とは	1
	コラム1: 天体力学の基礎を築いた人々	3
1.1.2	ケプラーの法則を導く	5
	コラム2: シリウスAとシリウスB	17
1.2	座 標 系	20
1.2.1	絶対座標系と慣性座標系	20
1.2.2	慣 性 座 標 系	21
1.2.3	天体や軌道面を基準とした座標系	23
1.2.4	機体固定座標系 $[X_B, Y_B, Z_B]^T$	25
1.2.5	速度および加速度の座標変換	26
1.3	軌 道 要 素	26
1.3.1	軌道の大きさと形状を指定するパラメータ	27
1.3.2	軌道面の向きを指定するパラメータ	29
1.3.3	軌道上の位置を指定するパラメータ	30
	章 末 問 題	33

## 2. 太陽系の天体

2.1	太陽系の構成	34
2.2	太陽系天体の概要	39

2.2.1 太陽と惑星間物質	39
コラム 3: HR 図	41
2.2.2 地球型惑星と小惑星帯までの天体	44
コラム 4: 世界の宇宙機関	48
コラム 5: 軌道共鳴	65
2.2.3 木星型惑星と天王星型惑星	66
コラム 6: ガリレオ衛星エウロパ	71
2.2.4 太陽系外縁天体	76
コラム 7: 太陽系外惑星あるいは系外惑星	80

### 3. ロケット方程式と打上げから静止軌道投入まで

3.1 ロケット方程式	82
3.1.1 ロケット推進の原理	82
3.1.2 ロケット方程式の導出	86
3.2 実際のロケット打上げ時に働く力	94
3.2.1 重力損失	95
3.2.2 グラビティターン	96
3.2.3 空気抵抗損失	97
3.2.4 コースティング	98
3.3 軌道への投入方式	98
3.3.1 ダイレクトバーン方式およびダイレクトアセント方式	99
3.3.2 ホーマン軌道遷移方式	100
3.3.3 軌道面変更	101
3.3.4 オール電化衛星（電気推進）による静止軌道投入方式	102
章末問題	103

### 4. 種々の地球周回軌道

4.1 軌道設計の目的	105
-------------	-----

4.2	地球の重力場のひずみによる摂動	113
4.3	太陽同期軌道	118
4.4	回帰軌道・準回帰軌道	124
4.5	地球同期軌道・静止軌道	128
4.6	太陽同期回帰軌道・太陽同期準回帰軌道	130
4.7	モルニヤ軌道・ツンドラ軌道	133
4.8	凍結軌道	136
4.9	準天頂軌道	138
4.10	軌道の比較	143
	章末問題	145

## 5. 月・惑星への航行

5.1	パッチドコニックス法と影響圏	146
5.2	スイングバイの原理	149
5.3	地球を出発し月または惑星に至る軌道	151
5.3.1	ロケットによる打上げ軌道と地球周回パーキング軌道	152
5.3.2	地球を脱出する双曲線軌道	155
5.3.3	太陽周回軌道	158
5.3.4	天体を周回する軌道	160
5.3.5	外惑星探査などへの拡張（スイングバイの利用）	163
5.4	月周回軌道への移行	163
5.5	惑星探査ミッションの解析	166
5.6	火星ミッションおよび金星ミッションへの応用	169
5.6.1	これまでの火星探査（打上げ日の特徴）	172
	コラム 8： 火星大接近	172
5.6.2	地球出発 → 火星到着軌道の相対速度	173
	コラム 9： 火星探査機「のぞみ」	173
5.6.3	火星離脱 → 地球帰還軌道の相対速度	175

5.6.4 地球出発 → 金星到着軌道の相対速度	178
章末問題	181

## 6. より高度な軌道設計に向けて

6.1 多体質点系の運動方程式	183
6.2 惑星方程式	187
6.2.1 ラグランジュの惑星方程式	188
6.2.2 ガウスの惑星方程式	189
6.2.3 惑星方程式に基づくミッション軌道の設計	190
6.2.4 静止軌道の軌道保持	191
6.3 ランデブー問題	195
6.4 ランベルト問題	203
6.5 $\Delta$ VEGA	207
6.6 制限三体問題	212
6.7 ラグランジュ点まわりの擬似軌道	219
6.8 弾道捕獲	225
章末問題	228

## 7. 宇宙航行のための数学・物理

7.1 運動量と角運動量	229
7.2 微分, 積分と微分方程式	232
7.3 円錐曲線	239
7.3.1 円錐曲線の概要	239
7.3.2 楕円のデカルト座標表示	240
7.3.3 楕円の極座標表示	241
7.3.4 楕円の幾何学的関係	242
7.4 ベクトルと座標変換	243

7.4.1	ベクトルの演算	243
7.4.2	極座標を使ったベクトルの微分	249
7.4.3	座標変換とベクトルの回転	251
7.4.4	楕円軌道上の速度ベクトル	255
7.5	数 値 計 算	256
7.5.1	代数方程式の解法	256
7.5.2	微分方程式の解法	258
7.5.3	高階微分方程式の解法	260
7.5.4	連立微分方程式の解法	261
7.5.5	数値積分の求積	261
	章 末 問 題	264
	<b>引用・参考文献</b>	<b>265</b>
	<b>章末問題解答</b>	<b>269</b>
	<b>索 引</b>	<b>285</b>



# 1

## 衛星・探査機の運動，軌道

本章では，人工衛星や探査機に限らず，すべての天体の運動の基礎となるケプラーの法則について紹介し，ニュートンの万有引力が働いている場における二体問題の基礎方程式から，それを導出する。併せて，どのような軌道を描くか，その軌道が維持されるときには何が保存されているかについて，また軌道上の衛星・探査機の運動を記述する際に必要となる座標系，軌道要素について述べる。これらは以降の章の基本となるものである。

### 1.1 ケプラーの法則

#### 1.1.1 ケプラーの法則とは<sup>1), 2), †1</sup>

恒星が織りなす背景の中をさまようように動く惑星の運行は，古代から人々の興味を惹きつけ，かつ悩まし続けた。特に火星の逆行現象<sup>†2</sup>などは人々を当惑させた。ヨハネス・ケプラー（1571～1630）は生涯にわたる研究の結果，このような運行についての経験則を見い出した。望遠鏡なしで天体観測を行った最後の偉大な天文学者であるティコ・ブラーエ（1546～1601）が大量の観測データをまとめ，それを引き継いだケプラーが惑星の運行に関する3つの法則

---

†1 肩付数字は，巻末の引用・参考文献の番号を表す。

†2 地球の公転周期は365日，火星は687日であり，地球は火星を途中で追い抜くことがある。このように内側の地球が火星を追い越すとき，地球から火星を見ると火星が逆に動いているように見える。この逆行現象は火星に限ったことではなく，外惑星は同じように逆行現象を起こす。一方，内惑星である金星や水星は地球を追い越すときに逆行現象を起こす。

## 2 1. 衛星・探査機の運動、軌道

を導いた。後にアイザック・ニュートン（1642～1727）は、彼の万有引力や運動に関する法則からケプラーの法則が導かれることを示した。15世紀のニコラウス・コペルニクス（1473～1543）から17世紀のニュートンまでの軌道力学の歴史をコラム1にて振り返る。

この節では、**ケプラーの法則**（Kepler's laws）について紹介する。ここでは、この法則を太陽の周囲を回る惑星や小惑星などに適用するが、恒星間や、地球やほかの大きな質量を持つ天体の周囲を回る自然の、あるいは人工の衛星に対しても成立する。図1.1に示すように、具体的には、以下の3つの法則をケプラーの法則という。

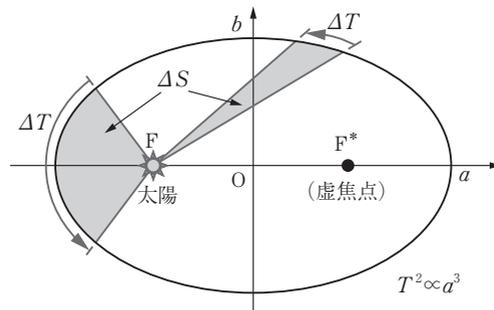


図1.1 ケプラーの法則

### ケプラーの法則

第1法則：軌道の形状を規定

すべての惑星は、太陽を焦点の1つとする楕円軌道（円錐曲線の1つ）を描いて運動する。

第2法則：軌道上の運動を規定（面積速度一定の法則）

惑星と太陽を結ぶ線分は、惑星軌道の平面内で同じ時間に同じ面積を掃く。

第3法則：ほかの軌道との間の関係（周期）を規定

任意の惑星に対して、周期  $T$  の2乗は軌道長半径  $a$  の3乗に比例する。



## コラム1： 天体力学の基礎を築いた人々



ヨハネス・ケプラー  
(1571~1630)<sup>†1</sup>

ヨハネス・ケプラー<sup>†1</sup>は、ティコ・ブラーエ<sup>†2</sup>が長年に亘って行った火星やその他の惑星の観測データを整理して、3種の惑星運動の法則を発見した（17世紀初頭）。第1法則は惑星の軌道は太陽を焦点とする楕円であるというもので、当時はまだ「天動説」、すなわち地球は不動で、太陽をはじめ恒星や諸惑星は地球の周囲を回るという考えが広く信じられていて、ニコラウス・コペルニクス<sup>†3</sup>の唱えた「地動説」、すなわち太陽を中心として地球も惑星も回っているという学説を信じる人は希な時代であった。

ブラーエは観測から地動説の証左となる年周視差を当時の観測精度では確認することができなかった

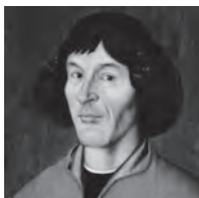
ため、太陽は地球の周囲を回り、惑星は太陽の周囲を回るという修正天動説を提唱し、それを事実で確証しようとして膨大な観測を積み重ねたのであった。ブラーエの観測データは望遠鏡のなかった当時、肉眼で観察されたものとしては最高の精度を持っていた。しかし皮肉にも、ケプラーはその膨大な観測データから帰納的に地動説を実証したのである。1609年に「新天文学」で第1、2法則を、1619年に「宇宙の調和」で第3法則を発表した。しかも楕円軌道を導入したことは真に画期的であった。

コペルニクスは不完全な円軌道ではないもの考えるのは無価値であると考え、ブラーエもまた惑星

の軌道は円軌道であると考えていた。ほぼ同時代で「近代科学の父・天文学の父」とも言われ、ケプラーとも親交のあったガリレオ・ガリレイ<sup>†4</sup>でさえ、すべての天体は完全な形である円を描いて運動するものだとして楕円運動を否定していたように、当時、天体は神聖なもの、したがって惑星は完全な形である円を描くはずであるという考えが圧倒的であった。ケプラーの態度は先見にとられず、自然現象をありのままに観察するという現代



ティコ・ブラーエ  
(1546~1601)<sup>†2</sup>



ニコラウス・コペルニクス (1473~1543)<sup>†3</sup>



# 2

## 太陽系の天体

太陽系は、恒星である太陽、および万有引力でその周囲を、直接的、あるいは間接的に公転する天体から構成される惑星系である。本章では、実用・観測・探査の対象である太陽系内の恒星（太陽）、地球をはじめとする惑星、衛星、準惑星、小惑星（帯）、エッジワース・カイパーベルト天体やオールトの雲など太陽系の天体の概要・全体像について述べ、いままでの研究開発成果や現在の状況、今後の計画などについて紹介する。太陽系の形成とその進化過程については、ほかの専門書を参照されたい。

### 2.1 太陽系の構成

**太陽系**<sup>1), 2)</sup> (solar system) は、太陽、およびその万有引力で、周囲を直接的あるいは間接的に公転する天体から構成される惑星系である。太陽系は**銀河系**（天の川銀河）の中心から約 26 000 光年離れたオリオン腕の中に位置しており、おもに、現在確認されている 8 個の**惑星** (planet)、5 個の**準惑星** (dwarf planet)、それらを公転する**衛星** ((natural) satellite)、そして多数の小天体からなる。総質量のうち、99.86%は太陽、残りの質量も 99%が木星、土星、天王星、海王星の 4 大惑星が占めている。太陽系は約 46 億年前、星間分子雲の重力崩壊によって形成されたとされている。図 2.1 に太陽系の全体的な概観を、また、表 2.1 に太陽系天体の分類、表 2.2 におもな太陽系天体のデータを示す。

惑星や準惑星、衛星、彗星のほかにも、太陽系には多数の小天体がある。火

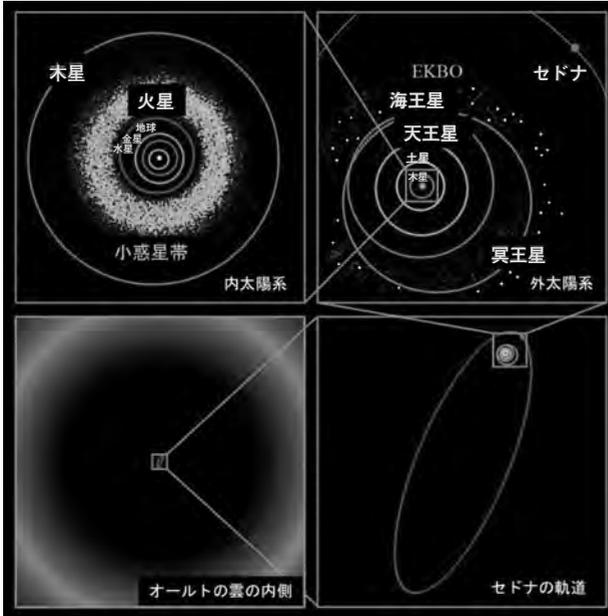


図 2.1 太陽系の全体的な概観 (EKBO: エッジワース・カイパーベルト天体) ©NASA (口絵 1)

星と木星の間にある**小惑星帯** (asteroid main belt) は、地球型惑星と同様に岩石や金属などから構成されている小天体が多い。それに対して、海王星の軌道の外側には、おもに氷からなる太陽系外縁天体が密集している**エッジワース・カイパーベルト天体** (Edgeworth-Kuiper belt object, EKBO) や**散乱円盤天体** (scattered disk object, SDO) があ

表 2.1 太陽系天体の分類

恒 星 (太陽)		
太陽のまわりを回る天体	惑 星	地球型惑星
		木星型惑星
		天王星型惑星
	準惑星	小惑星帯にあるもの (ケレスのみ)
		冥王星型天体
	太陽系小天体	冥王星型天体以外の太陽系外縁天体
		小惑星
彗 星		
		惑星間塵
太陽以外の天体 (惑星, 準惑星) のまわりを回り、間接的に太陽のまわりを回る天体	衛 星	

# 3

## ロケット方程式と打上げから 静止軌道投入まで

本章では、衛星、探査機を打ち上げるためのロケット推進の原理から、ロケットエンジンの基礎、その推力・比推力などの性能パラメータの導出、軌道投入に必要なとされる速度増分をどのように獲得するかを示す、最も基本的なロケット方程式を導き出す。その後、実際の打上げの際のシーケンスなどを参考に、静止衛星を地上からの打上げ、待機軌道、長楕円遷移軌道などを経て、地球静止軌道への投入までを紹介する。

### 3.1 ロケット方程式

#### 3.1.1 ロケット推進の原理

衛星や探査機を軌道に打ち上げるためには、所定の高度で、所定の速度を衛星や探査機に与える必要がある。ロケットエンジンはエンジン内部の燃焼室で推進薬を燃焼し高温高压のガスを発生させ、ノズルを通して膨張加速し、高速で後方に質量を放出して、その反作用で**推力** (thrust) を発生し、必要な速度増加を得るシステムである<sup>1)~3)</sup>。

いま、テストスタンド上で定常作動しているロケットエンジンを考え、ニュートンの運動量保存則（第2法則）を適用し、推力を求める<sup>4), 5)</sup>。テストスタンド上のロケットエンジンは、噴出する排気ジェットの反作用として推力  $F$  を発生しているが、逆方向に同じ大きさの力  $F$  をテストスタンドから受けて空間的に静止している（**図 3.1**）。

噴出する排気ガスの質量流量を  $\dot{m}$ 、密度を  $\rho$ 、流速を  $v_e$ 、ノズル出口断面積を  $A_e$ 、またノズル出口断面におけるガスの静圧を  $p_e$ 、外界圧力を  $p_a$  で表すこ

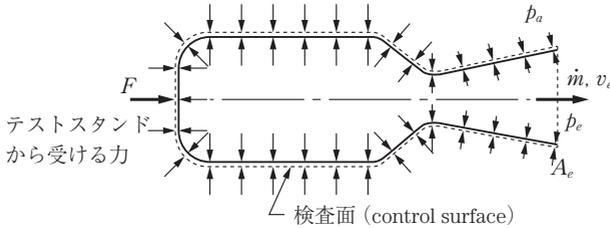


図 3.1 テストスタンド上で作動中のロケットエンジン<sup>4)</sup>

とにし、図に示すように検査体積としてロケット外壁面およびノズル出口断面によって囲まれる体積を考える。この時、検査面を通る物質の出入りは、ノズル出口面でのガスの流出のみである。したがって

- ・単位時間当たり検査面内に流入する運動量  $0$  (3.1)

- ・単位時間当たり検査面外に流出する運動量 
$$\int_{Nozzle\ Exit} (\rho \vec{v} \cdot dA) \vec{v} \quad (\because \int_{Nozzle\ Exit} (\rho \vec{v} \cdot dA) = \dot{m})$$
 (3.2)

- ・検査面 (control surface, *c.s.*) に作用する圧力  $F - \int_{c.s.} p dA$  (3.3)

上記 3 式に運動量保存則を適用すると、以下ようになる。

$$F - \int_{c.s.} p dA = \int_{Nozzle\ Exit} (\rho \vec{v} \cdot dA) \cdot \vec{v} - 0 \quad (3.4)$$

ここで、ロケット機体軸方向と推力方向が一致しているとし、 $\int_{c.s.} p d\vec{A}$  を右辺に移行すると

$$F = \dot{m}v_e + (p_e - p_a)A_e \equiv F_m + F_p \quad (3.5)$$

すなわち、ロケットの推力の大きさ  $F$  は式 (3.5) のように  $F_m = \dot{m}v_e$  と  $F_p = (p_e - p_a)A_e$  の和として表され、前者を**運動量推力** (momentum thrust)、後者を**圧力推力** (pressure thrust) と呼ぶ。式 (3.5) は周辺の大気圧に起因して、推力が  $p_a A_e$  だけ減少することを表している。ノズル出口面圧力  $p_e$  が周辺の大気圧  $p_a$  と等しくなるまで膨張する場合、 $p_e = p_a$  であり、推力は運動量推力のみとなる (**適正膨張**)。ノズル内の流れは**超音速流**なので、流路が広がれば、流れは膨張し、流速は速くなり、圧力は低くなる。したがって、燃焼ガスを加速するためには流れに沿ってノズルを広げることになる。しかし、ノズルを出ていく流れの向きは基軸に沿うようにした方が半径方向への拡散が抑えられ、

損失が少ない。そのため、ノズル出口では流れがノズルの軸と平行になるようになだらかに整形し、ノズル形状は**ベル (bell) 型**になる。ノズルのスロート部 (最狭部) と出口部の面積比を**ノズル膨張比** (nozzle expansion ratio) という。

ノズル出口圧力  $p_e$  が大気圧  $p_a$  より高ければ、**不足膨張** (under expansion) となり、ノズル出口で**膨張波** (expansion wave) が生じる。不足膨張の場合、圧力推力は大きいですが、流速が不足するので、推力は低下する。

一方、ノズル出口圧力  $p_e$  が大気圧  $p_a$  より低くなった場合は、**過膨張** (over expansion) となり、ノズル内で流れが壁から**剥離** (separation) し、流れが乱れ、推力が低下する。

ノズル出口での流速、圧力と大気圧とのバランスを考え、適正膨張するように設計することが望ましいが、ロケットの上昇とともに急激に変わる大気圧に合わせて、ノズル長さや出口径を変えて全範囲で適正膨張させることはできないので、ロケットの作動する範囲 (高度) を考え、どこか一点を適正膨張点に選んでノズルの設計を行うのが一般的である。

人工衛星のアポジ・エンジンや軌道・姿勢制御用エンジン、探査機の主推進用など外気圧が真空に近いところで用いるロケットは膨張比を大きくして適正膨張に近づけるのが、理論的には有利であるが、一方ノズルが長くなると質量が増加するとか、ノズル出口径が大きくなりすぎて下段のロケットの中に収納できなくなるなどの問題が発生する。これらのエンジンの性能は「真空中」での値で表記されることが多い。

打上げ用の第1段ロケット、その推力増強用の補助ロケット、すなわち外気圧が1気圧から真空に近い状態までの範囲で使われるロケットでは、ノズル内での流れの剥離や圧力推力の低下を避けるため、ノズル出口圧力が海面上大気圧に近くなる。これらのエンジンの性能は「海面上」および「真空中」の両者が併記される。

推力をニュートンの運動量保存則にならい、圧力推力も含めて、推進剤質量流量  $m$  と流速の積の形で表すと式 (3.5) は

# 4

## 種々の地球周回軌道

人工衛星はできるだけ効率良く観測や運用を行いたいものであるが、物理法則を無視するような軌道設計は不可能である。そこで地球重力場のひずみを利用してこれを実現する軌道が種々考案され、実際に利用されている。本章では地球重力場による摂動と、これを利用したきわめて有用な軌道を紹介するとともに、その成立条件について説明する。

### 4.1 軌道設計の目的

人工衛星（以下、衛星）<sup>†</sup>は高価なシステムである。さらに、その軌道投入には高額な打上げ費が必要であり、また運用では施設利用料や運用者の人件費が発生する。したがって、費用対効果を高めるために衛星は効率良くミッションを遂行し、また運用されることが望まれる。ところが、一般に衛星の軌道はその焦点が地球中心にあるので図4.1(a)のような軌道となる。そのため、例

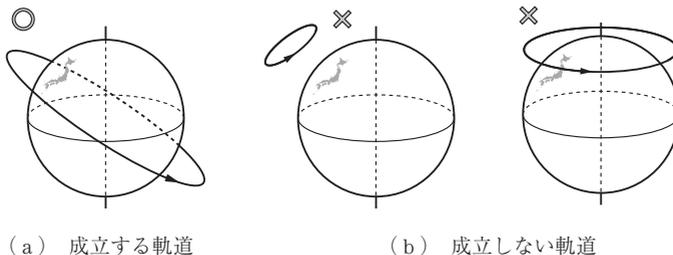


図4.1 成立する軌道 (○) と成立しない軌道 (×)

<sup>†</sup> 月などの天然の衛星と区別する必要がある場合は、人工衛星 (artificial satellite) と書かれることが多い。

例えば日本周辺の観測を行いたい場合には図(b)のような軌道が望まれるところではあるが、軌道面が地球中心を通らないため成立しない。

衛星の軌道に対する要求はミッションによって異なるが、大きく分けて以下のようなものがある。これらの要求を満たすような軌道を実現することが軌道設計の目的である。

#### 要求1. 特定地域の上空に長時間または頻繁にあること

地上の特定地域の観測を行うことを目的とする場合や、衛星によって収集された観測データを地上局のある特定地域で**ダウンリンク** (downlink)<sup>†1</sup>する場合、衛星を特定地域の上空に長時間留めたり頻繁に通過させたりすることは、ミッション遂行でも衛星運用でも強く望まれる。地球の自転により、衛星は軌道を周回するごとに**図4.2**のように**地上軌跡** (グランドトレース, ground trace)<sup>†2</sup>がずれていくが、ある一定時間経過後に地上軌跡が地球を1周してまた元の位置に戻るならば、特定地域の上空を頻繁に通過することになる。

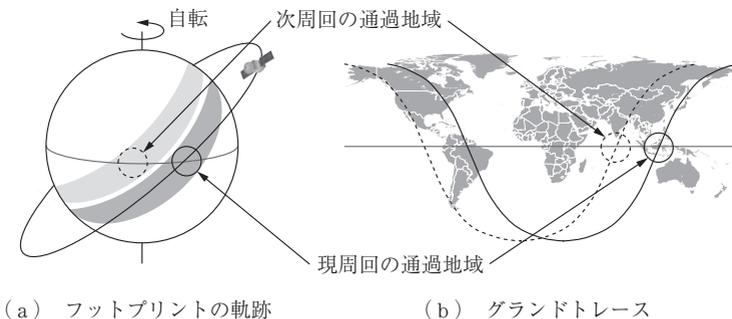


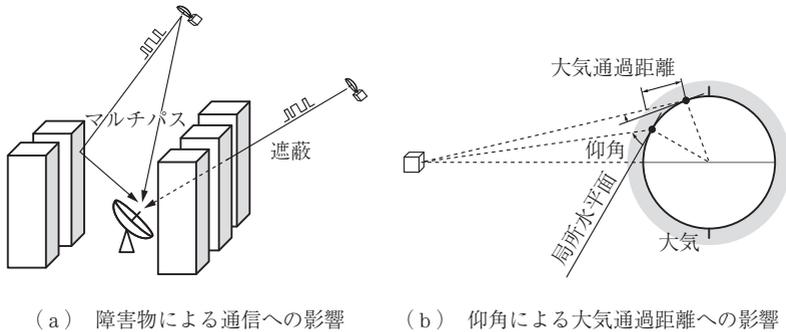
図4.2 一般的な衛星のグランドトレース

#### 要求2. 高仰角であること

山岳地帯や都市部では空の見晴らしが悪いため、**図4.3(a)**のように山や建

†1 衛星から地上へ通信によってデータを送信することをいう。逆に地上から衛星へ送信することを**アップリンク** (uplink) という。

†2 衛星と地球中心を結ぶ直線が地表と交わる点 (**天底** (nadir)) の時々刻々のつながりのこと。**グランドトラック** (ground track) ともいう。衛星との直接通信が可能な範囲は**フットプリント** (footprint) と呼ばれ、**図4.2(a)**の帯はフットプリントの軌跡である。



(a) 障害物による通信への影響 (b) 仰角による大気通過距離への影響

図 4.3 衛星の仰角の影響

物などの障害物によって衛星と地上局の間で通信経路が遮蔽されたり、電波が障害物で反射されてマルチパス (multipath)<sup>†1</sup>が発生したりする。また、図 (b) のように衛星の仰角 (elevation angle)<sup>†2</sup>が低くなると、天空雑音 (sky noise)<sup>†3</sup>によるノイズの増加や、大気通過距離が長くなることによる大気吸収損失 (atmospheric absorption loss)<sup>†4</sup>や降雨減衰 (rain attenuation)<sup>†5</sup>のために、搬送波対雑音密度比 (carrier to noise density ratio,  $C/N_0$ ) が悪化して通信の品質が劣化する。特に、後述する静止衛星の場合には高緯度地域では仰角が低すぎてこの影響が大きく、実利用にはきわめて不向きである。したがって、衛星の仰角を高くするための工夫が必要である。

### 要求 3. 低軌道であること

同程度の観測系を有している場合、図 4.4 のように高軌道であれば地上分解能は悪化するものの観測範囲はより広がる一方、低軌道<sup>†6</sup>であれば観測

†1 電磁波が直進だけでなく山や建物で反射されて複数の経路で伝搬すること。

†2 ある地点の局所水平面 (local horizontal plane) から上にある目標物を見る視線と局所水平面のなす角度。局所水平面より下にある場合は俯角 (depression angle) という。また、局所水平面内の基準方向 (通常は真北方向) と視線のなす角を方位角 (azimuth angle) という。

†3 大気からの熱放射が雑音となること。

†4 電磁波が大気中の分子の運動によって受ける散乱や吸収による損失。

†5 電磁波が雨粒によって吸収、反射されて減衰すること。

†6 低軌道 (low earth orbit, **LEO**) は一般に高度 2000 km までを指す場合が多い。ここから静止軌道までを中軌道 (medium earth orbit, **MEO**)、静止軌道より上を高軌道 (high earth orbit, **HEO**) と呼ぶ場合もある。

# 索引

<b>【あ】</b>	エネルギー積分	7	ガリレオ・ガリレイ	3
アイザック・ニュートン	エポック	21	慣性座標系	20, 198
アップリンク	エリス	38	慣性の法則	230
圧力推力	円	239	慣性力	196
アポジキックモータ	遠日点	29	<b>【き】</b>	
アルテミス計画	遠心力	200, 219	機体固定座標系	25
安定多様体	円錐曲線	10, 239	北側ハロー軌道群	223
	円制限三体問題	212	軌道6要素	27
<b>【い】</b>	円制限四体問題	225	軌道共鳴	65
移行点	遠地点	29	軌道遷移	203
位置制御	遠点	29	軌道短半径	28
一般化座標	遠方逆行軌道	57	軌道長半径	28
一般化速度	<b>【お】</b>		軌道保持	192
一般化力	オイラー法	258	軌道面基準座標系	24
一般摂動論	オイラー-ラグランジュ		軌道面ベクトル	8
緯度	方程式	236	軌道要素	26
緯度指数	オイラー力	200	軌道力学の出発点	6
	大きさ	243	軌道離心率	28
<b>【う】</b>	オール電化衛星	102	逆行	117
打上げ地点中心局地	オールトの雲	42, 44, 79	キャップストーン	224
座標系	<b>【か】</b>		仰角	107
宇宙機	海王星	75	共楕円軌道	196
宇宙多様体力学	外核	51	共通重心	184
運動エネルギー	回帰	125	局所垂直・局所水平	231
運動量	回帰軌道	125	局所垂直・局所水平	
運動量推力	回帰数	126	座標系	198
運動量保存則	回帰日数	126	局所水平面	107
	外積	245	銀河	34
<b>【え】</b>	外太陽系	38	近日点	28
衛星	外惑星	38	近日点移動	45
衛星測位システム	ガウスの惑星方程式	189	近日点引数	30
永年摂動	角運動量	8, 231	金星	47
エキセントリック	角運動量保存則	231	近接飛行	195
プラネット	火星	58	近地点	28
エッジワース・カイパー	過膨張	84	近地点引数	30, 117
ベルト天体			近点	28

近点引数	30	差分方程式	258	シンプソン 3/8 則	262
近点通過時刻	30	作用・反作用の法則	230	シンプソン則	262
<b>【く】</b>		三体問題	212	<b>【す】</b>	
グラビティターン	96	散乱円盤天体	35	推移行列	202
グランドトラック	106	<b>【し】</b>		水 星	45
グランドトレース	106	ジェイムズ・ウェッブ		垂直リアプノフ軌道	219
グリニッジ子午線	254	宇宙望遠鏡	218	推 力	82
<b>【け】</b>		時間遅延ダイバーシティ	139	スカラー三重積	247
系外惑星	80	シス・ルナ	218	スカラー場	248
経 度	254	質 点	229	スーパーアース	81
径方向	231	質 量	229	スーパージュピター	81
桁落ち	258	質量中心	184	スーパーシンクロナス	
ケプラーの軌道要素	27	質量比	87	遷移軌道	102
ケプラーの第 0 法則	8	ジャイアントインパクト説		スーパーローテーション	49
ケプラーの第 1 法則	9	弱安定境界理論	226	<b>【せ】</b>	
ケプラーの第 2 法則	14	周 期	29	正規直交系	251
ケプラーの第 3 法則	16	自由帰還軌道	57	制限三体問題	212
ケプラーの法則	2	自由空間損失	108	正三角形解	217
ケプラーの方程式	32	修正天動説	3	静止衛星	129
ケレス	38	収束判定	258	静止軌道	129
元 期	21, 30	周方向	231	積の微分法則	250
原始関数	233	重 力	213	積 分	233
<b>【こ】</b>		重力定数	6	接 線	233
降雨減衰	107	重力ポテンシャル	7, 114	雪 線	39
黄 経	30	主系列星	42	絶対座標系	20
降交点	120	準回帰軌道	125	摂 動	113, 186
降交点通過地方時	120	順 行	117	摂動関数	188
交点周期	125	準天頂衛星	139	摂動体	186
恒等変換	253	準天頂衛星システム	142	ゼロ速度曲線	214
黄道面	119	準天頂軌道	139	ゼロ速度曲面	214
勾 配	248	準ハロー軌道	219	遷移軌道	203
コースティング	98	春分点	21, 254	潜在的に危険な小惑星	64
コリオリ力	200	準惑星	34	全微分	235
コールドプルーム	51	昇交点	29, 120	<b>【そ】</b>	
コンステレーション	111	昇交点黄経	30	双曲線	10, 239
<b>【さ】</b>		昇交点赤経	29, 117	速 度	243
最小エネルギー軌道	204	昇交点通過地方時	120	速度三角形	244
サイトダイバーシティ	139	焦 点	240	<b>【た】</b>	
サテライトダイバーシティ	139	常微分方程式	258	第一宇宙速度	13
座標系	231	擾 乱	186	大気吸収損失	107
座標変換	251	小惑星帯	35, 62	台形則	262
		初期値問題	259	第二宇宙速度	14
		蝕	120		
		真近点離角	10, 30		

ダイモス	58	中点則	262	内 積	245
太 陽	39	超音速流	83	内太陽系	38
太陽系	34	長周期彗星	78	内惑星	38
太陽系外縁天体	76	長周期摂動	113	ナブラ演算子	248
太陽系外惑星	80	潮汐固定	38, 52	南 中	118
太陽系家族写真	72	長半径	240	南北制御	129, 192
太陽圏	42, 43	直線解	218		
太陽-地球系	216	直交行列	252	<b>【に】</b>	
太陽中心黄道面基準 慣性座標系	22	直交性	246	ニコラウス・コペルニクス	3
太陽同期回帰軌道	130	直交変換	251	二次曲線	239
太陽同期軌道	118			二体問題	5
太陽同期準回帰軌道	130	<b>【つ】</b>		日 陰	112
太陽風	42	ツイオルコフスキーの式	87	日 照	112
ダウンリンク	106	月軌道プラットフォーム	224	日心黄道座標系	22
楕 円	3, 10, 239	ゲートウェイ	224	二点境界値問題	259
楕円制限三体問題	225	ツンドラ軌道	136	ニュートン・コーツの公式	261
脱出軌道	14			ニュートンの運動方程式	230
脱出速度	14	<b>【て】</b>		ニュートンの万有引力	5
短周期彗星	78	低軌道	107	ニュートン法	256
短周期摂動	113	ティコ・ブラーエ	3	ニュートン・ラフソン法	256
弾道捕獲	226	定積分	233	ニュートン力学	229
短半径	240	適正膨張	83		
		天空雑音	107	<b>【の】</b>	
<b>【ち】</b>		天体中心座標系	23	ノズル膨張比	84
地 殻	51	天頂角	231		
地 球	51	天 底	106	<b>【は】</b>	
地球外知の生命体探査	68	天動説	3	ハウメア	38
地球固定座標系	23	天王星	74	墓場軌道	219
地球静止軌道	98	天文単位	38	パーキング軌道	100
地球中心黄道面基準 慣性座標系	22	<b>【と】</b>		薄明薄暮帯軌道	120
地球中心赤道面基準 慣性座標系	21	導関数	233	剥 離	84
地球中心赤道面基準 地球固定回転座標系	23	凍結軌道	136	ハビタブルゾーン	51
地球-月系	216	東西制御	129, 192	速 さ	243
地球同期軌道	128, 139	特殊摂動論	190	ハロー軌道	219
地上軌跡	106	特性エネルギー	214	搬送波対雑音密度比	107
地心慣性座標系	21	特性速度	99	反対称行列	184
地心黄道座標系	22	時計まわり	252	半直弦	10, 242
地心赤道座標系	21	土 星	71	反時計まわり	252
地動説	3	トランス・アース	218	反発係数	230
地方太陽時	120	トランス・ルナ	218	万有引力定数	6, 115
中軌道	107	トロヤ群	218		
中心力	249	トロヤ点	217	<b>【ひ】</b>	
				非可換	246
		<b>【な】</b>		飛行経路角	231
		内 核	51	比推力	85



<b>【数字】</b>		<b>【G】</b>	NRHO	223
1 恒星日	118	Galileo		
1 太陽日	118	GLONASS		
1 天文単位	5	GNSS		
2 行軌道要素	143		<b>【P】</b>	
2 行軌道要素形式	28	<b>【H】</b>	PMD	219
2-インパルスホーマン遷移			<b>【Q】</b>	
	100	HCI 系	QZO	139
3-インパルスホーマン遷移		HEO	QZS	139
	100	HR 図	QZSS	142
3 遠地点軌道	136	<b>【I・J】</b>		
<b>【C】</b>		ICS	RAAN	117
CDH	196	IPS	+ R Bar	196
Clohessy-Wiltshire (C-W)		ITN	- R Bar	196
解	202	JWST	<b>【S】</b>	
Clohessy-Wiltshire 方程式			Sat.D	139
	200	LEO	SD	139
CSI	196	LOP-G	SMD	226
C-W 誘導則	203	LST	SSO	118
<b>【D】</b>		LTAN		
Dawn-Dusk 軌道	120	LTDN	<b>【T】</b>	
DoD	112	LVLH	TAP	136
DRO	219	<b>【M】</b>	TDD	139
<b>【E】</b>		MEO	TPI	196
ECEF 系	23		<b>【V】</b>	
ECI 系	21	<b>【N】</b>	+ V Bar	197
		NAVSTAR/GPS	- V Bar	197

— 著者略歴 —

**竹ヶ原 春貴**（たけがはら はるき）

- 1979年 東京大学工学部航空学科卒業
- 1985年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（航空学専門課程）・工学博士
- 1985年 三菱電機株式会社勤務
- 1990年 湘南工科大学講師
- 1992年 東京都立科学技術大学講師
- 1994年 東京都立科学技術大学助教授
- 1999年 東京都立科学技術大学教授
- 2005年 首都大学東京教授
- 2020年 東京都立大学名誉教授，客員教授，現在に至る

**佐原 宏典**（さはら ひろのり）

- 1994年 京都大学工学部機械系学科（物理工学科）卒業
- 1996年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了（機械物理工学専攻）
- 1999年 東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了（航空宇宙工学専攻）・博士（工学）
- 2000年 科学技術庁航空宇宙技術研究所（現 JAXA）科学技術特別研究員
- 2004年 東京大学大学院工学系研究科産学官連携研究員
- 2008年 首都大学東京准教授
- 2016年 首都大学東京教授
- 2020年 東京都立大学教授，現在に至る

**石井 信明**（いしい のぶあき）

- 1982年 東京大学工学部航空学科卒業（宇宙コース）
- 1984年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（航空宇宙工学専攻）
- 1989年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（航空宇宙工学専攻）・工学博士
- 1989年 文部省宇宙科学研究所助手
- 1993年 文部省宇宙科学研究所助教授
- 2006年 JAXA 宇宙科学研究所教授
- 2024年 JAXA 宇宙科学研究所名誉教授

**古本 政博**（ふるもと まさひろ）

- 2014年 九州大学工学部機械航空工学科 卒業
- 2016年 九州大学大学院工学府修士課程修了（航空宇宙工学専攻）
- 2018年 九州大学大学院工学府博士後期課程修了（航空宇宙工学専攻）・博士（工学）
- 2019年 首都大学東京助教
- 2022年 株式会社 QPS 研究所勤務，現在に至る

# 人工衛星・惑星探査機のための宇宙工学

Fundamentals of Astronautics and Orbital Dynamics for Spacecraft

© Takegahara, Sahara, Ishii, Furumoto 2024

2024年6月28日 初版第1刷発行



検印省略

著者 竹ヶ原 春 貴  
佐原 宏 典  
石井 信 明  
古本 政 博  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来 真也  
印刷所 新日本印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04689-2 C3053 Printed in Japan

(松岡)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつと事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

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います。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いません。落丁・乱丁はお取替えいたします。