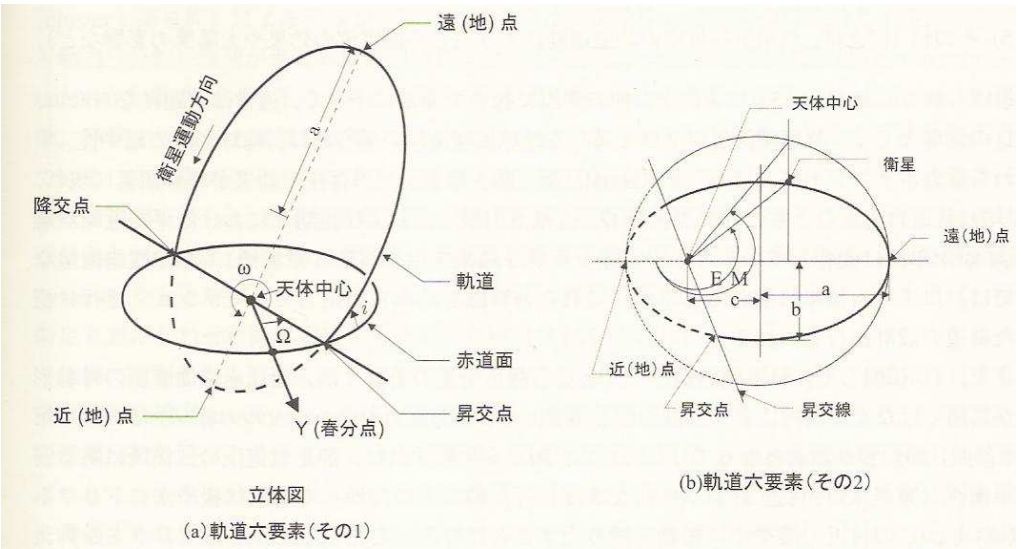
8.8. 軌道六要素

ある時刻 (エポック) における人工衛星の軌道 (一般に楕円軌道) と位置は、軌道六要素を用いて記述できる。次図は「人工衛星の力学と制御ハンドブック」より[42]。[h]



a:軌道長半径。円軌道のときは、円の半径。
e:離心率 ($e = 0$ は円軌道)。
i:軌道傾斜角。地球の赤道面と人工衛星の軌道面がなす角度。
Ω:昇交点赤経。$i \neq 0$ のとき、地球の赤道面と人工衛星の軌道面が交差する点の赤経。
ω:近地点引数。楕円軌道の場合、昇交点から測って近地点が軌道面上のどこに来るかを表わす。
以上 5 つのパラメーターで軌道は決まる。
M:平均近点離角。与えられたエポックにおける人工衛星の軌道上での位置を表す。

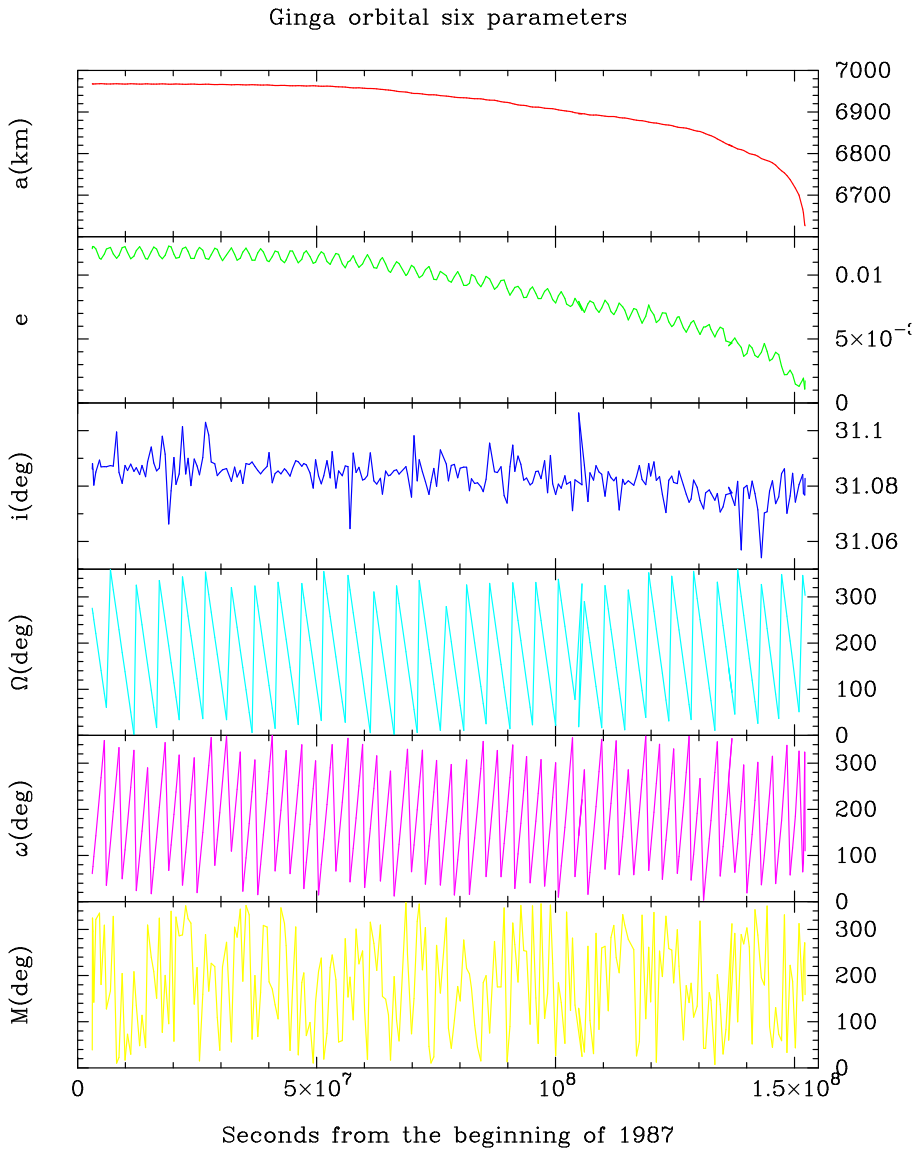
以下に、1987 年 2 月 5 日に打ちあげられ、1991 年 11 月 1 日に大気圏に再突入した「ぎんが」衛星の軌道六要素の時間変化を示す。

$e \approx 0$、ほぼ円軌道である。地球の半径は、約 6378km だから、ぎんが衛星の打ち上げ時の高度は、約 550 km。軌道傾斜角 i が、「ぎんが」衛星が打ち上げられた内之浦宇宙空間観測所の緯度に対応していることに注意しよう。地球の自転速度を稼ぐために、人工衛星は真東に打たれる。その結果、軌道傾斜角が打ち上げ地の緯度に一致することになる。

もし衛星の軌道の地球に対する相対的な位置が不変ならば、Ω も a, e, i と同じくほぼ一定のはずであるが、Ω は周期的に変化している。これは、地球が扁平である影響で人工衛星の軌道面が歳差運動をしているためである。ほぼ円軌道なので、近地点の位置を表わす ω はあまり意味を持たない。

ミッションの終了近くになって、大気の摩擦のために、急激に a が減少 (衛星が降下) していることがわかる。また、もともと離心率は小さくほぼ円軌道であったが、衛星が降下する

[42] http://spaceflight.nasa.gov/realdata/elements/graphs.html も参考に



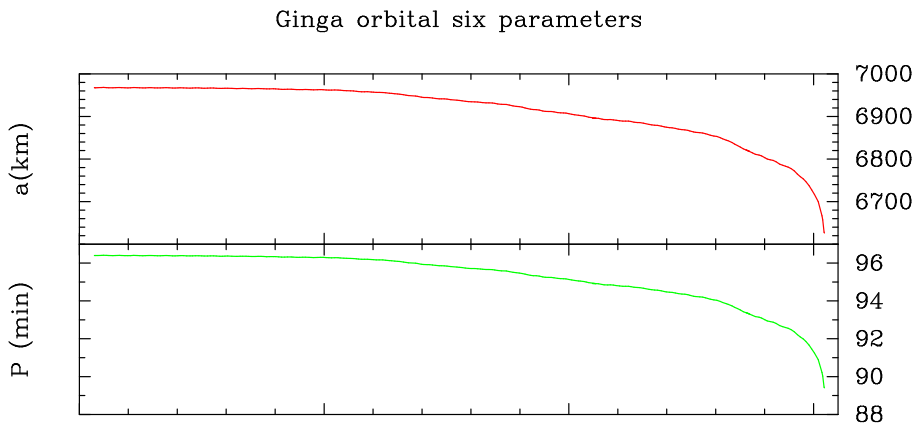
につれて、さらに円軌道からのずれが「なまされて」、離心率も減少していることがわかる。

式 (178) より、a から衛星の公転周期 T が求められる。地球のシュバルツシルト半径、$2GM/c^2 = 8.87\ \mathrm{mm}$ を使うと、以下のように簡単に計算できる。

$$T = \frac{2\sqrt{2}\pi a^{3/2}/c}{\sqrt{2GM/c^2}} = \frac{2\sqrt{2}\pi(a/6900\ \mathrm{km})^{3/2}(6900\ \mathrm{km})^{3/2}/(300000\ \mathrm{km/s})}{\sqrt{8.87\ \mathrm{mm}}}$$
$$= 95\ \mathrm{min}(a/6900\ \mathrm{km})^{3/2}. \qquad (181)$$

このようにして求められた公転周期と a の関係を以下に示す。

ぎんが衛星のように低高度の衛星は、一日に地球の周りを約 15 周することがわかる。



8.9. 静止衛星

地球の自転周期は 23 時間 56 分 4.09 秒である[43]。(181) から、人工衛星の公転周期が自転周期と等しくなるのは、$a = 42200$ km のとき (高度は約 35800 km)。赤道上、この高さにある衛星は地表から見て静止しているように見えるので、静止衛星と呼ばれる。常に地表から見えている必要がある通信衛星、放送衛星、気象衛星などは、静止軌道に打ち上げられる。

8.10. Two Line Elements

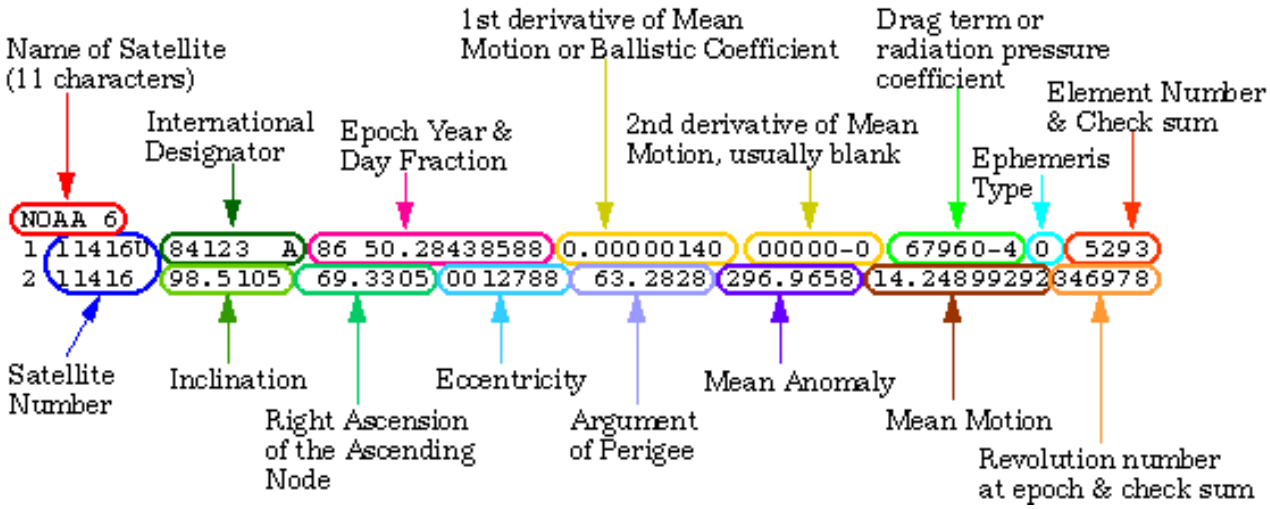
軌道六要素で衛星の軌道とある時刻における位置を表わすことができるわけだが、それと等価な情報とさらに衛星名、国際識別番号などを付加した情報を記述する、**Two Line Elements** (TLE) と言う標準的なフォーマットがある。

NORAD (NORth American aerospace Defence Command; 北アメリカ航空宇宙防衛司令部;`httm://www.norad.mil`) は、地球の周りを周回している (ほぼ) すべての人工衛星をモニターし、その軌道要素を TLE で公開している。TLE の説明については、`http://science.nasa.gov/Realtime/rocket_sci/orbmech/state/2line.html` を参照。そこから TLE の定義を再掲する。

軌道長半径 a の代わりに、一日あたりの周回数である、"Mean Motion" が使われていることに注意。いくつかの衛星について、具体的な TLE の値を見てみよう。現在地球を周回している衛星の最新の TLE は、たとえば `http://celestrak.com` から入手できる。

```
SUZAKU
1 28773U 05025A   08013.93865221  .00000558  00000-0  37528-4 0  6575
2 28773  31.4061 323.8498 0007001 164.9250 195.1602 15.00529329137995
ASTRO-F (AKARI)
1 28939U 06005A   08014.23580039  .00000005  00000-0  11192-4 0  6030
2 28939  98.2316  16.5778 0008622   0.3484 359.7729 14.57435459100351
HINODE (SOLAR-B)
```

[43] 24 時間ではないことに注意。太陽に対して同じ向きになる周期が 1 日=24 時間。




```
1 29479U 06041A   08013.94377495  .00000087  00000-0  26130-4 0  4426
2 29479  98.0789  23.2007 0014564 229.4553 130.5382 14.62802560 69920
INTEGRAL
1 27540U 02048A   08012.45833333  .00000061  00000-0  10000-3 0  6500
2 27540  86.3672  23.5282 7969010 276.7243 358.3858  0.33418208  2558
HIMAWARI 6
1 28622U 05006A   08014.77456198 -.00000264  00000-0  10000-3 0  4588
2 28622   0.0211  76.8046 0002163  49.6656  46.0362  1.00271868 10549
```

これから、以下のことが読みとれる。(1) すざく (X 線天文衛星)、あかり (赤外線天文衛星)、ひので (太陽天文衛星) は、一日に約 15 周回する、低軌道衛星である。ひまわりは一日に一周回する、静止衛星である。INTEGRAL 衛星は三日で一周する、大きな軌道である。(2) INTEGRAL は離心率が大きな楕円軌道を持つが、他の衛星はほぼ円軌道である。(3) すざくの軌道傾斜角は、ぎんがと同じく、内之浦から真東に打ちだしているので、内之浦の緯度に対応して 31.4 度である。ひまわりは赤道上の静止衛星なので、軌道傾斜角は 0 度。あかり、ひのでの軌道は、赤道とほぼ直交している。はこの二つの衛星は太陽同期軌道を持ち、軌道面が常に太陽を向いていて、ちょうど昼と夜の境目を周回している。それによって、ひのでは常に太陽を観測することが可能である。一方、あかりは、つねに地球と反対向きの空を観測することが可能になっている[44]。

巻に、TLE から衛星軌道を計算したり表示させたりするプログラムが溢れている。たとえば、http://science.nasa.gov/Realtime/jtrack/3d/JTrack3D.html、http://www.lizard-tail.com/isana/lab/googlesat/googlesat2_plus.php などを参照。前者は、衛星の軌道を 3 次元的に表示し、そのスケールや向きをインターアクティブに変更できる。後者は、Google map 上に衛星の位置をリアルタイムで表示できる。

[44] 地球は赤外線を出すので、赤外線衛星にとってはノイズ源になる。