

人工衛星の軌道

松野久也

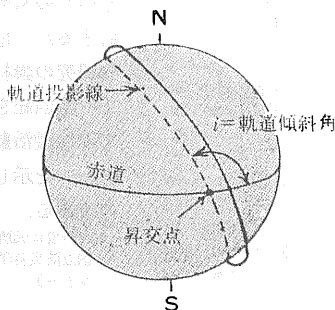
人工衛星（以下単に衛星と呼ぶ）は地球表面から非常に高いところを飛ぶためにその運動は地球上の大部分の場所から追跡することができる。また逆に衛星からは広大な面積の地表を観測することができる。このような衛星の特徴・機能を利用して現在通信衛星と地上局とを結びつけた世界的な総合情報システムが急速に完成されようとしている。さらに広域気象観測衛星による世界的な規模での気象観測データが日常の天気予報のデータとして使用されつつある。さらに測地衛星種々の科学衛星があり航行衛星資源探査衛星などが実現に向かって急テンポで開発されつつある。こうして衛星を中心とする情報システムへの積極的参加が世界各国で叫ばれるようになってきた。

資源探査衛星について目下アメリカ合衆国で進められている EROS（地球資源観測衛星=Earth Resources Observation Satellite）計画を中心にして本誌第182号で紹介した。最近ではソビエト連邦が打ち上げたソユーズ9号が資源探査衛星の実現への大きな第1歩の1つとして注目されよう。

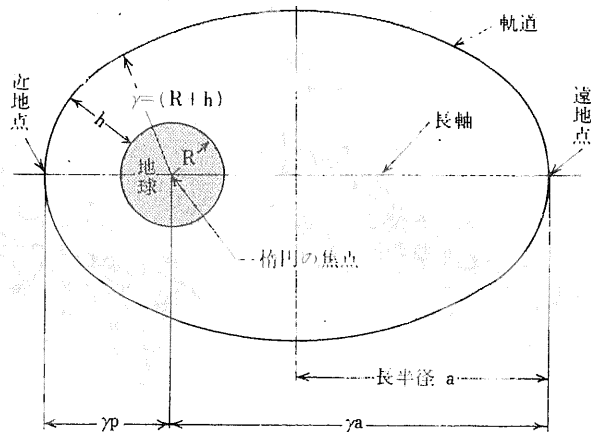
さて宇宙空間から地球表面の観測・探査を行なう場合観測・探知装置の分解能との関連もさることながら根本的にはこれらの運搬手段である衛星の軌道の形・高度・飛行方向・赤道面に対する軌道面の傾斜角・地球の自転など一連の要素（軌道要素）の影響をうけるのである。今回はこの軌道要素について末尾の文献¹⁾に従って解説してみよう。

軌道の形

きわめて常識的に考えてもわかるように地球表面の観測・探査に用いられる衛星の軌道は観測結果の解析



第1図a
円軌道



第1図b
楕円軌道

を簡単にし観測範囲およびデータの分解能が均一になるようにするため出来るだけ円軌道（第1図a）であることが望ましい。しかしながら現実の問題として正確な円軌道に衛星をのせることはむずかしい。したがってすべての衛星は楕円軌道をとっているものと考えてよい。つまり地球の中心が楕円の一方の焦点にある軌道（第1図b）である。本年2月11日に打上げられたわが国初の衛星「おおすみ」の軌道要素は宇宙開発事業団の発表によれば遠地点5,140km 近地点350km 周期144分 軌道傾斜角31.181° 偏心率0.26253と発表された。すなわち楕円軌道において軌道上で地球の中心からもっとも遠い点が遠地点 同じくもっとも近い点が近地点である。

円軌道速度

軌道高度 速度および軌道公転周期の間の関係を理解するためはじめ円軌道について述べることにしよう。

R = 地球の平均半径 (6,370km)

h = 地球表面から衛星までの高度

r = 地球の中心から衛星までの距離 ($r = R + h$)

m = 衛星の質量

v = 軌道上における衛星の速度

g_h = 軌道上での重力加速度

とすると円軌道では衛星の求心力 mv^2/r はその軌道高度における重力に等しくなる。

$$\frac{mv^2}{r} = mg_h \dots\dots\dots(1)$$

$$v = \sqrt{rg_h} \dots\dots\dots(2)$$

しかし 重力の法則から

$$g_h = \frac{GM}{r^2} \dots\dots\dots(3)$$

G = 万有引力常数

M = 地球の質量

したがって (2) 式は

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{GM}{R+h}} \dots\dots\dots(4)$$

となる。地球では G および M が一定であるから $GM = K$ となる。軌道速度を km であらわす場合 $K = 3.99 \times 10^5 km^3/sec^2$ である。したがって

$$v = \frac{631}{\sqrt{r}} km/sec = \frac{631}{\sqrt{6,370+h}} \dots\dots\dots(5)$$

となる。これを時速になおすと

$$v = \frac{2.27 \times 10^6}{\sqrt{6,370+h}} \dots\dots\dots(6)$$

ある特殊な実験を行なうとき 必要なのは地球表面上での速度である。ここでは地球の自転の影響を無視して 自転のない地球表面上の速度を v'_g とすると

$$v'_g = \left(\frac{R}{R+h}\right)v = \left(\frac{R}{R+h}\right)\sqrt{\frac{K}{R+h}} \dots\dots\dots(9)$$

$$v'_g = \frac{1.446 \times 10^{10}}{(6,370+h)^{\frac{3}{2}}} km/hr \dots\dots\dots(10)$$

となる。

円軌道周期

円軌道周期は次式によって簡単に求められる。すなわち。周期を P とすると

$$P = \frac{2\pi(R+h)}{v} = 2\pi \frac{(R+h)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{K}} \dots\dots\dots(11)$$

$$P = 2.77 \times 10^{-6} (6,370+h)^{\frac{3}{2}} hr$$

$$= 1.661 \times 10^{-4} (6,370+h)^{\frac{3}{2}} min \dots\dots\dots(12)$$

上述の各式から求められる円軌道高度と周期との関係は第1表の通りとなる。この表中にある他の数字については後述する。

赤道上 円軌道にあって24時間周期の衛星は 地球の自転の周期に等しく 地球に対して静止しているかのように見える。その例として INTELSAT (世界商業通信衛星) ATS (応用技術衛星) などがあって 一名地球同期衛星ともいわれる。その軌道高度は (12) 式あるいは第1表から求められ 約35,815kmである。

楕円軌道

前述の通り實際上衛星を正確な円軌道にのせることは困難であり すべての衛星は大なり小なり楕円形の軌道をとっているとみてよい。TIROS 衛星のいくつかは実際上の目的からみて無視してもよい位円に近い軌道をとっている。楕円軌道上で衛星は遠地点から近地点に向かって速度を増し 逆に近地点から遠地点に向かって速度を減少する。

そして 近地点における衛星の速度は円軌道上同じ高度にある衛星のそれよりも大きく 楕円軌道上の衛星は近地点から遠地点に戻るために 外部から余分なエネルギーを加える必要がない。したがって 遠地点における衛星の速度は 同様に同じ高度の円軌道上の衛星のそれに比べて小さいことはいうまでもない。

楕円軌道における衛星の速度の誘導は やや複雑である。したがって ここではその結果だけについて述べることにする。前述の注記および第1図 b から

r_p = 近地点において地球の中心から衛星までの距離

$= R + h_p$ h_p は近地点における軌道高度

r_a = 遠地点において地球の中心から衛星までの距離

$= R + h_a$ h_a は遠地点における軌道高度

a = 軌道楕円の長半径 $= \frac{r_a + r_p}{2}$

v_p および v_a : それぞれ近地点 遠地点における軌道速度

とすると

$$v = \sqrt{K \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \dots\dots\dots(13)$$

$$v_p = \sqrt{K \left(\frac{2}{r_p} - \frac{1}{a} \right)} = \sqrt{\frac{K(2a-r_p)}{ar_p}} \dots\dots\dots(14)$$

$$v_a = \sqrt{K \left[\frac{2}{(2a-r_p)} - \frac{1}{a} \right]} = \sqrt{\frac{Kr_p}{a(2a-r_p)}} \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{v_p}{v_a} = \frac{2a-r_p}{r_p} = \frac{r_a}{r_p} \dots\dots\dots(16)$$

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{K}} \dots\dots\dots(17)$$

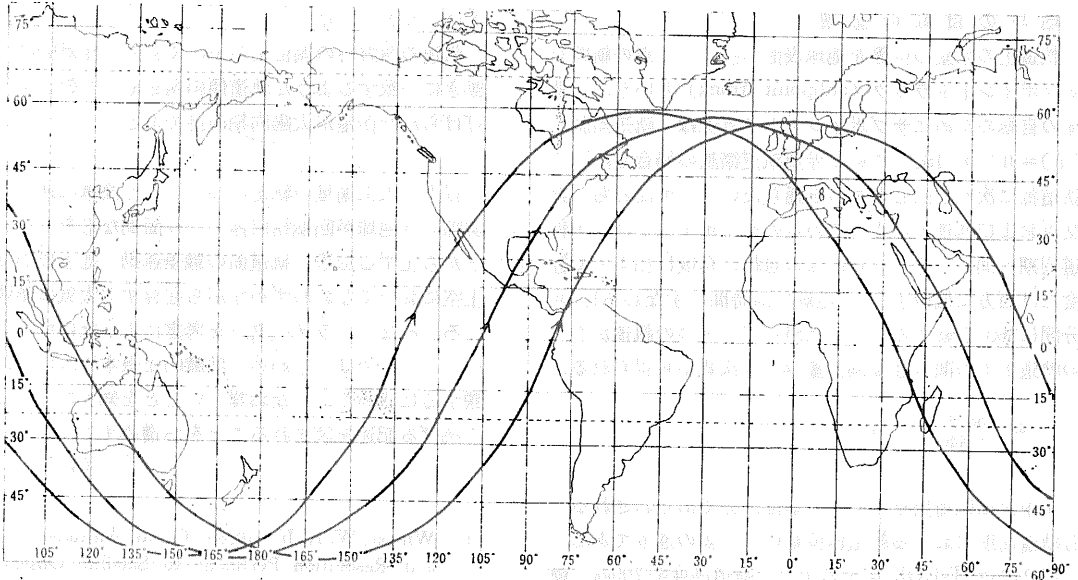
$$P = 2\pi \sqrt{\frac{\left[R + \frac{1}{2}(h_p+h_a) \right]^3}{K}} \dots\dots\dots(18)$$

楕円軌道上の衛星の軌道周期は (17) (18) 式に示す通り 円半径を楕円の半長径におきかえたときの円軌道の衛星の周期と同じ関係によって決まる (第11式参照)。そこで 楕円の短軸が衛星の周期に何らの影響を与えないとすると 衛星の速度はどうなるであろうか 天体力学の法則によれば 同じ速度の衛星が地球からある距離のところを運動するときには その運動方向とは無関係に軌道の半長径は等しくなる筈である。しかし楕円の

第1表 軌道高度に対応する軌道要素(円軌道 地球の平均半径 R=6,370km)

軌道高度 (km)	R + h (km)	$\left(\frac{R+h}{R}\right)$	$\left(\frac{R}{R+h}\right)$	軌道速度 (km/hr)	地上速度 (自転のない場合) (km/hr)	軌道周期		軌道当りの 西方偏位 (Deg. Long.)	太陽同期傾斜角 (Degrees)	最大緯度* (Degrees)
						hours	min.			
150	6,520	1.024	.9770	28,111	27,464	1.458	37.48	21.87	96.15	83.85
185	6,555	1.029	.9717	28,080	27,285	1.463	38.08	22.02	96.27	83.73
200	6,570	1.031	.9695	28,004	27,150	1.476	38.56	22.14	96.33	83.67
250	6,620	1.039	.9622	27,901	26,846	1.492	39.52	22.38	96.49	83.51
278	6,648	1.044	.9582	27,839	26,675	1.502	40.12	22.53	96.59	83.41
300	6,670	1.047	.9550	27,795	26,544	1.509	40.54	22.64	96.67	83.33
350	6,720	1.055	.9478	27,690	26,245	1.526	41.56	22.89	96.85	83.15
371	6,741	1.058	.9450	27,649	26,128	1.533	41.98	23.00	96.92	83.08
400	6,770	1.063	.9408	27,589	25,956	1.543	42.58	23.15	97.03	82.97
450	6,820	1.071	.9339	27,488	25,671	1.560	43.60	23.40	97.22	82.78
463	6,833	1.072	.9322	27,462	25,600	1.565	43.90	23.48	97.26	82.74
500	6,870	1.079	.9271	27,386	25,390	1.578	44.68	23.67	97.41	82.59
550	6,920	1.086	.9204	27,287	25,115	1.595	45.70	23.93	97.60	82.40
556	6,926	1.087	.9197	27,277	25,087	1.597	45.82	23.96	97.67	82.33
600	6,970	1.094	.9138	27,189	24,845	1.612	46.72	24.18	97.79	82.21
649	7,019	1.102	.9075	27,095	24,589	1.629	47.74	24.44	97.98	82.02
650	7,020	1.102	.9073	27,092	24,581	1.629	47.74	24.44	97.97	82.01
700	7,070	1.110	.9009	26,995	24,320	1.647	48.82	24.71	98.19	81.81
741	7,111	1.116	.8957	26,919	24,111	1.661	49.66	24.92	98.36	81.64
750	7,120	1.118	.8945	26,902	24,064	1.664	49.84	24.96	98.40	81.60
800	7,170	1.126	.8883	26,807	23,813	1.682	50.92	25.23	98.59	81.41
834	7,214	1.131	.8842	26,725	23,630	1.697	51.82	25.46	98.75	81.25
850	7,220	1.134	.8821	26,715	23,565	1.699	51.94	25.49	98.83	81.17
900	7,270	1.141	.8761	26,624	23,325	1.717	53.02	25.76	99.03	80.97
927	7,297	1.146	.8729	26,575	23,197	1.727	53.62	25.91	99.15	80.85
950	7,320	1.149	.8701	26,531	23,085	1.735	54.10	26.03	99.26	80.74
1,000	7,370	1.157	.8642	26,441	22,850	1.753	55.18	26.30	99.49	80.51
1,019	7,389	1.160	.8620	26,408	22,764	1.760	55.60	26.40	99.57	80.43
1,050	7,420	1.165	.8583	26,352	22,618	1.771	56.26	26.57	99.71	80.29
1,100	7,470	1.173	.8526	26,264	22,393	1.788	57.26	26.82	99.94	80.06
1,112	7,482	1.175	.8513	26,243	22,341	1.793	57.58	26.90	99.00	80.00
1,150	7,520	1.181	.8469	26,179	22,171	1.806	58.36	27.09	100.19	79.81
1,200	7,570	1.189	.8413	26,089	21,949	1.825	59.50	27.38	100.43	79.57
1,205	7,575	1.189	.8409	26,083	21,933	1.826	59.56	27.39	100.45	79.55
1,250	7,620	1.196	.8360	26,005	21,740	1.842	60.52	27.63	100.67	79.33
1,297	7,667	1.204	.8307	25,925	21,536	1.860	61.60	27.90	100.91	79.09
1,300	7,670	1.204	.8305	25,919	21,526	1.861	61.66	27.92	100.92	79.08
1,350	7,720	1.212	.8251	25,834	21,316	1.879	62.74	28.19	101.17	78.83
1,390	7,760	1.218	.8208	25,769	21,151	1.894	63.64	28.41	101.38	78.62
1,400	7,770	1.220	.8198	25,752	21,111	1.897	63.82	28.46	101.43	78.57
1,450	7,820	1.228	.8146	25,670	20,911	1.915	64.90	28.73	101.69	78.31
1,483	7,853	1.233	.8111	25,615	20,776	1.928	65.68	28.92	101.87	78.13
1,500	7,870	1.236	.8094	25,589	20,712	1.934	66.04	29.01	101.96	78.04
1,550	7,920	1.243	.8043	25,508	20,516	1.952	67.12	29.28	102.23	77.77
1,575	7,945	1.247	.8016	25,468	20,415	1.961	67.66	29.42	102.38	77.62
1,600	7,970	1.251	.7992	25,428	20,322	1.971	68.26	29.57	102.52	77.48
1,650	8,020	1.259	.7942	25,349	20,132	1.989	69.34	29.84	102.78	77.22
1,668	8,038	1.262	.7924	25,321	20,064	1.996	69.76	29.94	102.90	77.10
1,700	8,070	1.267	.7893	25,267	19,943	2.008	70.48	30.12	103.08	76.92
1,750	8,120	1.275	.7844	25,191	19,760	2.027	71.62	30.41	103.37	76.63
1,761	8,131	1.277	.7834	25,175	19,722	2.031	71.86	30.47	103.43	76.57
1,800	8,170	1.283	.7796	25,113	19,578	2.046	72.76	30.69	103.67	76.33
1,850	8,220	1.291	.7749	25,039	19,403	2.064	73.84	30.96	103.96	76.04
1,853	8,223	1.291	.7745	25,033	19,388	2.066	73.96	30.99	103.99	76.01
35,815	42,185	6.622	.1510	11,052	—	24.000	1,440.00	—	—	—

* (太陽同期軌道傾斜角に対して)



第2図 典型的な TIROS 衛星のサブポイントトラック(軌道高度約 700km 軌道傾斜角 58°)

短軸——長軸は一定として——が短くなればなる程軌道径路の長さは小さくなる。だが長軸が一定の場合には周期も一定であるから 軌道を運動する衛星の平均軌道速度 $= (v_a + v_p) \times \frac{1}{2}$ は小さくなる。

また 楕円軌道上の衛星の最高速度 (v_p) と最低速度 (v_a) との関係は (16) 式のような簡単な関係にある。すなわち遠地点速度と近地点速度の比は遠地点距離と近地点距離とに反比例する。

軌道傾斜角

以上 軌道の形と軌道速度とについて述べたが 衛星の軌道位置を決める重要な要素として軌道傾斜角と昇交点とがある(第1図a)。昇交点とは衛星の軌道が北向きに赤道と交差する点であり 軌道傾斜角 (i) は衛星の軌道面と地球の赤道面との間の角度であり 赤道面から逆時計まわりに測定される。軌道傾斜角が 90° より小さい軌道は 軌道速度の赤道方向の分値の方向が地球の自転の方向と同じであることから 順行(prograde)軌道と呼ばれる。他方 軌道傾斜角が 90° より大きい軌道は 逆行(retrograde)軌道と呼ばれる。逆行軌道の軌道傾斜角は 逆行という言葉をつけて その補角 ($180^\circ - i$) で示されることがある。たとえば 軌道傾斜角 103° の軌道は 逆行 77° の軌道である。

軌道傾斜角(逆行軌道の場合にはその補角)の値は軌道が通過する最高緯度の値に相当する。いいかえると 衛星の軌道は軌道傾斜角あるいはその補角の値より低い ($\leq i$ あるいは $\leq 180^\circ - i$) すべての緯度に到達ある

いはこれを横ぎるのである。このように軌道傾斜角によって衛星がカバーする限界が決定されるのである。軌道傾斜角 0° または 180° の軌道は赤道軌道と呼ばれ 90° の軌道は極軌道と呼ばれる。後者の場合には赤道から両極まで地球全面をカバーすることができる。

昇交点

前述の通り衛星の軌道位置を決める要素の1つとして昇交点がある。地球は絶えず自転しているので 昇交点位置は天球座標系の赤経(天文経度)によって決定されなければならない。赤経は 天球上のある点について 春分点から東に向かって測定された角距離である。したがって昇交点位置は 昇交点に対応する子午線までを東向きに春分点から測定される。

地球と軌道との関連において 一定の軌道の昇交点を規定するには 衛星が北向きに赤道を横ぎる地点の経度と時間とが用いられる。赤経によって与えられた昇交点位置と緯度(時圏)によって与えられたそれとの関係は時差あるいは適当な暦表から決定される。アメリカ合衆国で年3回発行されている「航空暦(Air Almanac)」では グリニッジの赤経が10分間隔で示されており 必要な値を内挿法で求めることができる。

衛星の回転 すなわち軌道の数は 昇交点を基準にして数えられる。第1周は最初の昇交点から始まり 打上げから最初の昇交点までの径路を軌道0と呼ぶのである。

地球の自転の影響

軌道上の衛星の位置を地球表面へ投影した点の軌跡をサブポイントトラック (subpoint track) という。地球の自転のためにサブポイントトラックは 軌道傾斜角 (i) = 0° or 180° である赤道軌道衛星の場合を除いて軌道毎に次々と同じところを通らない。すなわち 昇交点および軌道上のすべての点のサブポイントは 1 軌道周期の間に それぞれ地球の自転の角度に相当する経度だけ西方に偏位する。地球は24時間 すなわち1,440分間に 360° 自転する。したがって 1つの軌道から次の軌道までの間の経度偏位量 $\Delta\lambda$ は次式から得られる。

$$\Delta\lambda = \frac{360P}{1,440} = 0.25P$$

式中 P は軌道周期であり 単位は分であらわされる。各軌道高度における軌道偏位量は第1表の通りである。

第2図は TIROS 衛星の1つ 軌道高度約700km 軌道傾斜角 58° の衛星のサブポイントトラックをメルカトル投影の地図にプロットしたものである。このときその形は波長 $(360 - \Delta\lambda)^\circ$ 振幅 58° の波形となる。逆行軌道の場合には振幅はその補角 $(180^\circ - i)$ となるこ

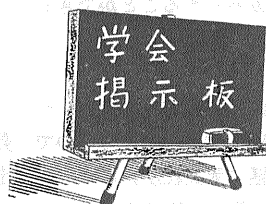
とはいうまでもない。

軌道の西方への偏位量が 15° であり 相対的に太陽の動きに一致するような軌道傾斜角をもった軌道上に打上げられた衛星が太陽同期衛星である。

以上 人工衛星の軌道についてごく簡単に述べた。実際には地球が回転楕円体という面倒な形をしていることから生ずる影響 軌道面の歳差運動 地上数100kmの上空においてなおわずかながら在存する大気の影響などいろいろなパラメーターを考慮に入れなければならない。ここでは きわめて常識的な根本についてだけ解説するに止めた。なお詳しいことを知りたい方は 次に掲げる記述を読まれることをお進めする。

(筆者は応用地質部)

1. WINGER, W. K. Jr. (1966) : Orbits, Altitudes, Viewing, and Resolution Pertinent to Satellite Observations of the Earth and Its Atmosphere, Pros. 4th Symp. Remote Sensing.
2. 竹内 瑞夫(1968) : 人工衛星の軌道論 新天文学講座 9 天文学の応用 恒星社.



・日本地下水学会

1. 昭和45年11月13日 (金)~14日(土)
2. 日本地下水学会 昭和45年度 秋季講演会および見学会
3. 福岡市渡辺通り2丁目 電気ビル本館12階
4. 日本地下水学会・九州鑿井業協会 (共催)
5. 川崎市久本135 地質調査所水資源課内 日本地下水学会 ☎ (044) 86-3171 (代)

・日本地質学会

1. 昭和45年10月2日(金)~4日(日)
2. 日本地質学会第77年総会ならびに学術大会
3. 静岡大学理学部教育学部 (静岡市大谷836) 静岡県民会館 (静岡市大手町)
4. 日本地質学会
5. 日本地質学会事務局 (東京都文京区 東京大学理学部地質学教室内 ☎ (03) 814-0549)

・日本火山学会

1. 昭和45年10月31日(土)~11月2日(月)
2. 日本火山学会 秋季大会
3. 青森県上北郡十和田町 休屋「博物館ホテル」会議室

4. 日本火山学会

5. 東京都文京区弥生1-1-1 東京大学 地震研究所内 日本火山学会 ☎ (03) 813-7421

・日本応用地質学会

1. 昭和45年10月8日(木) 午後1.30~
2. 45年度講演会
3. 地質調査所東京分室 (東京都新宿区河田町8)
4. 日本応用地質学会
5. 東京都中央区銀座6-15-1 国立防災科学技術センター内 日本応用地質学会事務局 ☎ (03) 542-1063

・石灰石膏学会

1. 昭和45年11月13日(金)~14日(土)
2. 石灰石膏学会 第41回学術講演会及び見学会
3. 秋田産業会館 秋田市中通り1番地 ☎ (0188) 32-3868
4. 石灰石膏学会
5. 石灰石膏学会 東京都千代田区駿河台 日本大学理学部内 ☎ (03) 293-3251

[注] 1. 開催年月 2. 会合名 3. 会場 4. 主催者
5. 連絡先 (掲載順位は原稿到着順)