

気球型測地衛星

森 巧*

1. はじめに

気球型測地衛星の打上げについて具体的な計画が議論される段階にきました。昭和42, 3年頃, 打上げを提案して以来, 測地学会や衛星測地研究会等で国土地理院や水路部の担当者がときどき報告してきましたが, 書きものとしては, ごく少数の人の目に触れているにすぎません。この衛星は最早や古典的で非常にわかり易く, あらためて書く程のこともないのですが, 反面, わかり易いことが災いしてか, 他の分野の人達には誤解も受け, 何度か同じ議論を繰り返すはめになりました。本紙に機会をいただきましたので, むづかしい話でなくて恐縮ですが, 意図するところを説明させていただきます。

気球型測地衛星は1960年代に米国が打ち上げたエコー, パジオスなどの気球型衛星の表面に多数のレーザ反射体を貼りつけたものとお考えください。この衛星では, 写真観測で方向がきまると同時に, レーザ測距によって距離の絶対値がきまります。しかも非常に精密に測れるように設計されているのが特長です。

以下, この衛星の観測による測地法の精度と, 衛星の機能などについて順に説明します。

2. 位置決定の幾何学

距離と方向を同時に測定すれば, 衛星と観測点の相対位置ベクトルがきまります。他の観測点でも全く同じ時刻に観測をしてその観測点と衛星を結ぶもう一つの位置ベクトルをきめると, これら2つのベクトルの差として, 2つの観測点の相対位置がきまります。数学的にはこのとおりなのですが, この2つのベクトルを独立に扱い, たとえば方向観測の精度を ± 0.3 , 衛星までの距離をそれぞれ 2000 km としますと, 一般には1桁小さい距離測定の誤差を無視しても, ベクトルの差の決定精度は測点間の距離にかかわらず ± 4 m となるようにみえます。これでは見栄えがよくないのでつぎのように考えます。

図1をみてください。2地点 AB で同時に衛星 S の位置ベクトル AS, BS を測定します。きめようとする測点間の相対位置 AB は AS-BS で, これは先程述べたとおりです。つぎに誤差を見積ります。簡単のために方向角観測の精度はいつも半径 ϕ (角度) の円, 距離測定の精度もつねに $\pm \delta$ であるとしします。ベクトル AS の決定誤差は半径 $\phi \rho_A$ (ρ_A は AS の長さ), 厚さ 2δ の

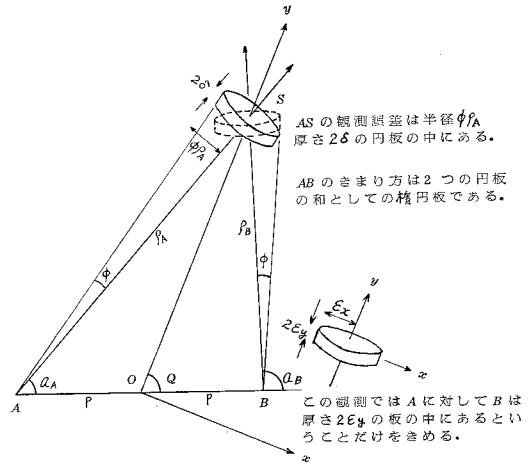


図1 位置決定の幾何学

円板の中にあります。円板の軸は AS です。同様にベクトル BS の決定誤差も, BS を軸にもち, 半径 $\phi \rho_B$, 厚さ 2δ の円板の中にあります。したがって, ベクトル AB の決定精度は, この二つの誤差円板を合成したものとなります。具体的にみるために, 原点を 2 地点 A, B の中点, y 軸を原点から衛星へ方向, x 軸を A, B, S 含む面内で y 軸に直交させ, また, z 軸を面の法線とする座標系を採って, この座標上で, 上記誤差の各成分の 2 乗和をつくるとつぎのようになります。

$$\begin{aligned} \epsilon_x^2 &= 2\phi^2[y_s^2 + p^2 \cos^2 Q] \\ &\quad + \delta^2[\sin^2(Q - \alpha_A) + \sin^2(Q - \alpha_B)] \\ \epsilon_y^2 &= 2\phi^2 p^2 \sin^2 Q \\ &\quad + \delta^2[\cos^2(Q - \alpha_A) + \cos^2(Q - \alpha_B)] \\ \epsilon_z^2 &= 2\phi^2[y_s^2 + p^2] \end{aligned}$$

(x_s, y_s) は衛星の位置, $p = 1/2 \cdot |AB|$, Q, α_A, α_B は図のとおりです。距離測定の精度は後述のように $\pm 15 \sim 30$ cm とします。 y_s はつねに衛星の軌道高度より大きくなりますから, 先の例を引き合いに出しますと, ϵ_x, ϵ_z は ± 4 m ということになります。しかし ϵ_y だけは衛星までの距離に無関係で, 一般には他の成分にくらべて, 何分の 1 という大きさです。AB の決定精度を上げるには誤差の小さい y 成分だけを成果として採用し, 他の 2 成分を捨てることにすればよいわけです。すなわち, 1 回の同時観測できるのは, 原点と衛星を結ぶ直線の法面の一部である, 重さ $1/\epsilon_y^2$ の面方程式ひとつだけということになります。この場合には, ベクトル

* 海上保安庁水路部

T. Mori: Geodetic Balloon-Satellite

は独立な3枚の面の交点としてきまるので少くとも3回の同時観測が必要で、しかも原点からみて、衛星は互いに直交する方向にあるのが望ましいということになるのですが、これも一般に可能です。但し、実際の整約では、他の2成分を捨てるのではなく、1回の観測から重さの異なる3枚の位置の面（直交はしない）の観測方程式をつくります。このうち2枚の観測誤差は ϵ_2^2 とほぼ同形ですが、直交しないので解への寄与は大きくありません。

結果としての位置ベクトル AB の決定値の相対精度は、 AB 間の距離である程度大きい場合は、 δ の項が無視できて、ほぼ

$$\frac{\epsilon_y}{2p} \div \frac{\phi}{2}$$

となり、測点間の距離にかかわらず方向観測の精度そのままとなります。もし方向決定のための写真観測に何等かの工夫があって、しかも観測回数も稼ぐということにして、 $\phi = \pm 0'3$ が達成できたとすれば、相対精度は

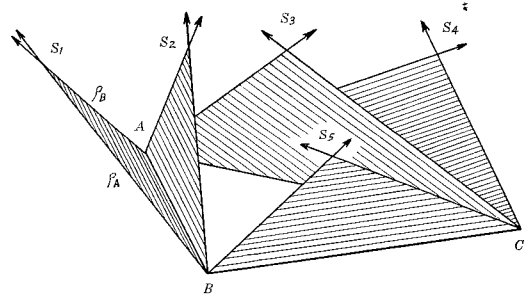
$$\pm 1 \times 10^{-6}$$

となります。これは測地測量の分野では決して悪い数値ではありません。測地座標系の原点をどのようにとり、座標軸の方向をどのように定義し、スケールは何に拠ってきめるかは、種々の議論のあるところですが、この場合は世界時 UT1 と極運動の観測値があることを前提としている他には、なんの理屈もはさまずに、一つの使いなれた測地系が、しかも天文学の精度で確立できることとなります。このことはこの衛星による測地観測システムの最大の特長です。

また測点間の距離が 200~400 km の場合を考えてみます。三次元測地に限った話ですが、このスケールは、従来の古典的測地法がより優れている範囲と、宇宙技術による最新の位置決定法が効力を発揮する範囲との谷間のようなところですが、われわれのシステムでは $\pm 30 \sim 50$ cm と計算されますので、この谷間を埋めるもっとも有効な手段の一つになるかと思えます。

蛇足になりますが、ここでエコー、パジオスなどの衛星を観測した場合の幾何学について触れておきます。これらの衛星、とくにパジオスの観測が現在の各種の衛星測地座標系の確立にいかにも重要な役割を果してきたかは、書くまでもないことですが、この幾何学をせまい日本の測地に適用した場合の想像が、われわれの衛星の覚えを悪くしている原因の一つではないかと思われるからです。

気球型衛星では同時観測が原則です(図2)。A, B で同時に衛星 S_1 の方向を観測して、平面 ABS_1 をきめます。2回観測すれば、2平面の交線として AB の方向ベクトルがきまりますが、もう一点 C と同じような観測をしますと、最小限5対の観測で三角形 ABC の



AB の同時観測で板 ABS_1 がきまる。2回目の観測で板 ABS_2 がきまる。この2枚の板の交点として方向ベクトル AB がきまる。同様に A と C の2回の観測で方向ベクトル AC がきまる。B と C の1回の同時観測で板 BCS_3 をきめれば、 $\triangle ABC$ がきまる。スケールは別にいれらるとして、きまり易さは、たとえば板の厚さ $\phi \sqrt{\beta_A^2 + \beta_B^2}$ である。

図2 パジオスの観測の幾何学(参考)

形がきまります。スケールを別にいれれば、三角測量と同じ要領で測地網が出来上ります。この場合、位置決定の精度は面の厚さで表現でき、われわれの場合と同じ記号を使えば ϵ_2 に相当します。衛星までの距離 ys を含みますのでどうしても大きくなることは避けられませんし、どの範囲の測量をするかによって、軌道高度を選ばなければなりません。

これに反して、距離測定もできるわれわれの衛星での測地精度は、既に述べたように、軌道には無関係です。軌道高度が大きければ、互いに遠く離れていても、高い視高度で観測できるので有利です。極端な例として、月レーザの同時観測による測地法があるとしますと、月にはすでに精密な暦があるので方向観測がなくても、同じ幾何学が使えます。この場合、暦の精度が $\pm 0'1$ ならば $\pm 0.3 \times 10^{-6}$ の測地ができるということになります。

3. 衛星の機能

この衛星はエコー、パジオスにレーザ反射器をつけたものと書きましたが、具体的には図3をみてください。できるだけ具体性をもたせるために、寸法や反射器の数などを書き入れましたが、これらの数字は、昭和40年代の中頃に提出した試案のもので、一つの目安です。そ

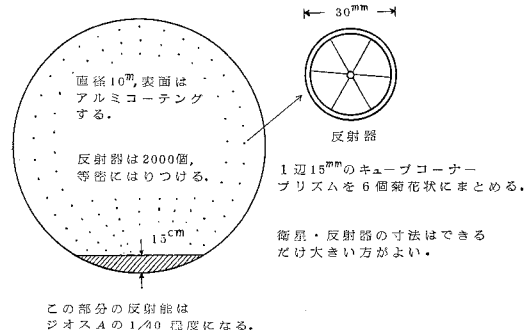


図3 気球型測地衛星概念図

の後の宇宙技術の進歩は目覚しく、実際にはもっと具合のよいものが期待できそうです、光ってみえることと、レーザを反射することが機能のすべてですが、観測面からの要請として具体的に説明します。

写真観測

写真観測によって方向角を精密に測定するためには、特別な方法を見つけないかぎり、天体の写真観測と同じく、衛星と比較星を同時に撮影すること、大気擾乱の影響を統計的に小さくすること、および乾板測定の精度をよくする工夫をするなどが重要になってきます。これらの要求を同時にみたす解として、多数のしたがって 8,9 等級の比較星と時刻との対応のつく衛星像を同じ明るさの点像として同一露光中に撮影するというのがわかり易いと思います。具体的には、赤道儀に乗せた有効視野 5° ほどの天体写真望遠鏡に、間欠露光のためのシャッターをつけて、100 個の比較星と時刻の記録のある 100 個の衛星像を、衛星通過する 20~40 秒間に撮影するという程度のことです。両方とも 100 個あれば、偶然誤差はほぼとり除けるので、他のことは、天体の写真観測に共通の問題であるともみなすことができます。前節で $\phi = \pm 0.3^\circ$ が何らかの方法によって達成できると考えたのは天文観測からの連想に他なりません。

さて、ここでは、観測装置については述べる余裕はありませんので、結果的に衛星を含めたシステムに見合った機械が作れるとして、衛星がもつべき機能について述べます。

まず、微かな恒星を点像として写すためには望遠鏡は赤道儀に乗せる必要があります。この赤道儀に乗った望遠鏡で、高速に運動する衛星を点像として写すためには衛星についてはきわめて短い露出を繰り返すことになり、この短い時間に十分な露光量を与えるだけの明るさが衛星自身に備っていなければなりません。光源として、アンナのように閃光を発生することも思いつきますが、一枚の乾板で 100 回、衛星が天空を横切る 10 分間に 10 枚の写真をとるとして、四方八方に十分の明るさで合計 1000 回も発光させるとなると技術的にも難しいところがあるかと思われまふ。これに反して太陽光を反射する気球は、表面をアルミコーティングすれば、全反射光の 95% は鏡面反射であり、安定した明るさが容易に得られます。また、シャッター速度を加減することにより、比較星と同じ明るさに写せる（衛星の天頂距離が大きく暗いときはみかけの速度も小さく長い露出ができる）などの利点があります。反面、アンナは毎日でも観測できるのに、この衛星は限られた時期の薄明頃にしかみえないという如何ともし難いところもあります。

衛星は球型である限り、反射点と中心の関係は容易に

計算できるので、いくら大きくても測量精度を悪くすることはありません。衛星のみかけの明るさは、直径の 2 乗に比例し、衛星までの距離の 2 乗に反比例します。以下、具体的な概念をうるために、この衛星は直径 10 m で軌道高度 1500 km にあるとします。この衛星は天頂にあるとき、2.8 等級にみえ、4200 km の軌道にある直径 30 m のパジ奥斯とほぼ同じ明るさです。しかし写真にとる場合、焦点面上単位面積あたりの露光量は、衛星像が乾板上を走る速さに反比例しますので、同一の望遠鏡を用いたときの写り易さは軌道高度の関数になります。天頂にあるときは、 $h/\sqrt{a_e+h}$ (h は軌道高、 a_e は地球の半径) に比例し、また、天頂距離でみると、軌道高度が大きいほど、暗くなり方が減少します。表 1 には、比較のためにパジ奥斯の場合と並べて書いておきます。 m_0 はみかけの明るさ、 m_p は写真の写り易さを任意スケールで表わしたもので、大気減光も計算してあります。但し、 m_p は天頂距離の一関数ではありませんので、その中で最も暗い値を表にしました。

表 1 衛星の明るさ

	気球型測地衛星			パジ奥斯		
	直径 10 m 軌道高度 1500 km			直径 30 m 軌道高度 4180 km		
天頂距離	ρ (km)	m_0 (m)	m_p (m)	ρ (km)	m_0 (m)	m_p (m)
0°	1500	2.8	3.8	4180	2.6	2.3
30°	1680	3.1	4.0	4545	2.8	2.4
45°	1949	3.6	4.3	5040	3.2	2.7
60°	2428	4.3	4.8	5812	3.8	3.1
65°	2657	4.7	5.1	6143	4.2	3.5
70°	2931	5.2	5.4	6514	4.5	3.7

m_0 はみかけの明るさで、実際の写真観測では m_p が目安である。パジ奥斯より 1.5~1.7 等級だけ暗い。

レーザ測距

ジャイアントパルスレーザを用いて ± 1 nsec (± 15 cm) の測定ができる時代になりました。設計はこれを目標にします。図 1 のとおり、気球の半径を 5 m としますと、地上でレーザを射てば、衛星の前面からほぼ 3 m 内にあるすべての反射器から帰ってきます。反射器の配置がわかっているとして、発射光の波形を解析すれば原理的には、衛星の姿勢、したがって、中心の位置は計算できますが、そこまでしなくとも、短いパルス (例えば 0.5 nsec 幅) のレーザを発射して衛星の前面に反射し、したがって、一番最初に帰ってくる光子の飛行時間を測定するというにすれば確実に精度のよい測定ができます。このための必要条件は、衛星が真球であり、その

半径が ± 15 cm 以内に正確にわかっていること、及び前面から 15 cm 以内のところにも少くとも 1 個の反射器があることです。図のように全面に等密に設置すれば、姿勢によらず、どの方向にも全く同じ反射能をもつこととなります。最初に受信した光子の飛行時間だけでなく、帰ってきた光子の総量を併せて測定することにすれば、距離測定値の信頼度を統計的に評価することもできます。

反射器としては、キューブコーナープリズムを 6 個、図のように菊花状にまとめたものとします。キューブコーナープリズムの正面へ入射した平行光線の反射指向性は、幾何学的に正しく作られた場合でも、回折現象によって鈍化し、鈍化の度合はプリズムの開口径の関数になります。指向性を良くするためには、大きなプリズムを使えばよいわけです。しかし、現実には反射光の中心軸は衛星の軌道運動による光行差のために、入射方向から衛星の進行方向にわずかに傾きます。この反射光を同じ望遠鏡で受信するためには、むしろ回折を積極的に利用して反射光が適当な拡がりをもつように設計します。1500 km の軌道にある衛星の通過を真横からみたときの光行差は $4'9''$ です。反射光は光行差の 2 倍の偏角をもちますから、入射光の光軸から約 $10''$ のところへの反射の能率がもっともよくなるようにすればよいことになり、この場合はプリズムの長辺は 33 mm と計算されます。図では、1 辺 15 mm のものを使っていますが、こうしますと反射器は直径 30 mm、厚さ 4 mm の硬貨状 (10 円玉は直径 23 mm、厚さ 1.5 mm) になって、気球の表面にはりつけるには、こんなものかなとした当初の思いつきにすぎません。大きくすれば数は少なくてすむわけですが、このままのものを 2000 個つけることにしますと、前面 15 cm の部分 (斜線) の反射器の数は 30 個、有効面積は 120 cm^2 程度、反射能力は、ジオス A を直下でみたときの $1/40$ 程度です。

但し、この衛星の反射能は等方的であり、ジオス A はそうではありませんから、たとえば天頂距離 70° でくべると、ほぼ同じ程度になります。いずれにしても反射能は大きいほどよい測定ができますので、今後の検討課題です。

軌道

衛星の軌道は、同時観測の機会と衛星の寿命をきめる要素です。

軌道高が位置決定の幾何学に、無関係であることはすでに述べました。しかし、軌道を高くすると、太陽に照される時間が長く、従って観測機会が多くなり、また広い地域での観測が可能になります。反面、高くなれば、観測がむずかしくなることも事実です。

先ず、写真観測では、気球型は軌道高が大きくなって

も、写真観測にはそれほど負担にならないことは、この衛星をバジオスの軌道まで打上げても天頂での m_p が 0.9 等級しか暗くならないことで分ります。更に同じ地域の測量では、軌道高度が大きければ、天頂距離の小さいところで観測できますので、大気擾乱の影響を小さくできるし、雲にかくれる率も少ないので却って好ましいと言える場合もあります。

レーザ測距のむずかしさは距離の 4 乗に比例します。試案作成当時にくらべて、測距技術は大幅に発展し、いまでは、高度 5000 km のラジオスが数 cm の精度で測れる装置もあると聞いています。しかし、足場の悪い孤島などでということになると、簡単ではなさそうです。図 3 の仕様が改善されるとしても、確実な成果を上げるためには、すでに何度か書きましたように 1500 km くらいが適当ではないかと考えますが、如何がなものでしょうか。

軌道傾角はみえる機会の総日数とその分布にかかわります。衛星は薄明帯の近くを通るときだけ見えますので、地上の場所を問わないということにすれば、傾角の大小にかかわりなく、観測できる機会の総量は一定です。しかし両極での観測をしないときは、傾角は 90° でない方が他での率がよいという理屈を用いれば、日本の測量には 50° くらいがよろしかろうということになります。極軌道の場合はみえる日がつき、そのあとにみえない日ももっと長くつづくという具合ですが、傾角が低くなるに従って、見える日と見えない日がだだらつづくという傾向が大きくなります。それに伴って待機日数が長くなり、労働力が余分に必要となりますが、人件費は衛星を含めた設備投資に比べて小さいので考えなくてよいと思います。但し、日本の天気分布、移動速度と言ったものは確かめた上で、最終的な決断をすべきであると考えます。

4. おわりに

気球型測地衛星は、国土地理院と水路部が東西 3100 km 南北 2800 km の我が国の領土、領海に一元的な測地座標系を確立する手段の一つとして、打上げを要請しているものです。測地衛星 1 号として、順調にゆけば昭和 57 年度の実現が期待されています。

測地事業の重要さは、明治時代に実施された三角、水準測量の成果が、その後のわが国の文化・産業の発展にいかにか寄与してきたかを思い起していただければ十分に理解されるでしょう。第 2 世代の測地事業という言葉があるかどうか知りませんが、狭い国土により高い文明を育て、また新しい活動の場を海洋に展開してゆくための礎を築く作業の開始をこの衛星の打上げが飾ってくれることでしょう。