

世界の測地座標系とその動向

Geodetic Datums in the World

測 地 部 松 坂 茂
Geodetic Department Shigeru MATSUZAKA

要旨

測地座標系とその成り立ちについて解説し、世界各地で用いられている座標系の主なものを紹介する。また、測量技術の発展やグローバルな情報手段の展開に伴った測地系の改訂や要求される姿等について述べる。

1. 序論

測地網を構築して得られる測地(座標)系(データム)は歴史的、地域的に数多くのものが存在している。各システムは、地域や国の独自の事情で構築されたものであり、本来独立したものである。しかし、現代における様々な分野のグローバル化と共に、測地系相互の関係や統一した座標系の必要性が増してきた。各国、各地域は、技術の進歩に従って測地系を改訂してきたが、今後は、全地球的な座標系との関係を考えることなしに自国の座標系を維持することはできなくなると思われる。

2. 測地系とは

地球上の位置を測定し、記録にとどめておくためには何らかのシステム(座標系)が必要である。まず考えつくことは、地面に石を置き順番に番号か名前を付けていくことである。この場合のシステムは、自然数の数列または名前のリストである。ただし、そのままでは石がどこにあるかわからないから、石と石との間の距離や方向を計る必要がある。さらに、高さも測れば経験的に地球上の位置を表現するのに必要十分な(水平位置、高さ)という3次元の座標が得られることになる。最初においた石を原点と呼ぶことにすれば、原点(の位置)を決め、方向と高さの基準を与えれば、他の石の位置が決定されるシステムである。このシステムは局所的に使う限り、原点や基準の方向をどのように選んでもあまり問題は生じない。ただし、測地事業のように広い地域に拡大しようとする、地球の形や大きさを意識しないわけにはいなくなってくる。そこで、地球の表面をよく近似しかつ数学的に単純な形として回転楕円体を選ばれその上の測地学が生まれた。その際、楕円体は地表面になるべくフィットしている方がよいし、さらに楕円体の回転軸とX(東)軸は、それぞれ地球の回転軸および経度0度方向と平行であれば都合がよい。楕円体を使ってシステムを作り上げるときに必要なとなるのが、

原点の経緯度 λ_0, ϕ_0

原方位 A_0

楕円体原子 (a, f)

の5つのパラメータと楕円体を地球に固定する仕方で、これらの定義量とそれをもとに計算された測地網内の点の座標を測地系(データム)、固定された楕円体を準拠楕円体という。具体的な構築法は参考文献に詳しいが、その概要を述べると以下ようになる。

①適当な楕円体を選び、原点の座標を与える。

楕円体原子を決め、原点に経緯度と高さを与える。経緯度は、天文観測から得られた値とし、高さは平均海面(ジオイド)からの高さとする。楕円体と地球は原点と鉛直方向を共有していることになるが、このままでは向きが不確定である。

②楕円体の向きを決める。

天文観測を行って、原点から測地網内の他の一点(原位標)を見た時の方位角(北からの角度)つまり原方位を決定する。これにより楕円体の子午面と天の子午面が平行になり、楕円体の向きが決まったことになる。

楕円体上で展開する測地学は本質的に2次元であることに注意したい。高さは、ジオイドを基準として水準測量で決定されるから、楕円体とは直接関係のないシステムである。水平位置(緯度・経度)を求めるためには、3次元的観測値である角度と距離を楕円体上におとして計算しなければならない。そのとき必要になるのが実際の高さと楕円体からの高さの差、つまりジオイドと楕円体との距離(ジオイド高)である。ジオイドの形状は過去においては正確には知られていなかったため、ジオイド高を無視して計算を行うのが普通であった。そのためジオイド高の変化が大きい地域では、位置座標が系統的な誤差を持つことになった。

さて、原点から測量を進めて各点の位置を求めていくと、どうしても実際の地球とのずれが明らかになってくる場合が多い。この原因は、採用した楕円体が最適のものではなかったということである。そこで新たな観測データを用いて、最適の楕円体と原点位置を求めて各点の位置を再計算すれば、より正確なデータムの構築が可能になる。

地球を最も良く近似する回転楕円体の決定には、19世紀以来多くの試みがなされてきた(表-1参照)。現在

は、人工衛星等の観測によって、精密な値が得られている。国際測地学会（IAG）が標準値として発表している値（GRS80：測地基準系1980）は、以下のとおりである。

$a = 6378137\text{m}$ 赤道半径
 $1/f = 298.257222101$ 扁平率の逆数
 $GM = 39860047 \times 10^7 \text{m}^3 \text{s}^{-2}$ 地心引力常数
 $\omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{rad s}^{-1}$ 自転角速度

3. 世界の測地系

各国が独自の測地系を構築してきた結果、世界には現

在数10の測地系と20以上の楕円体が存在している。

ヨーロッパでは18世紀に各国が独自の三角網を形成しはじめ、19世紀にはほぼ全ヨーロッパを覆うようになった。第二次世界大戦後、各国の網を一つにまとめあげようとする努力でヨーロッパアンデタム(ED50, 79, 87)が作られた。アメリカ合衆国では、19世紀に測地網の構築が始まり、20世紀初頭のニューイングランドデータムを経て、北アメリカデータム1927(NAD27)が完成した。その後、宇宙測地技術を取り入れて大幅に改訂されたNAD83が使われている。日本では、明治時代に日本測地系が作られたが、大きな地震の地殻変動を考慮した

表－1 楕円体とパラメータ

楕円体名	長半径 a (m)	扁平率逆数 1/f
Airy (1830)	6377563.396	299.324964
Modified Airy	6377340.189	299.3249646
Bessel (1841)	6377397.155	299.1528128
Clark 1866	6378206.4	294.9786982
Clark 1880	6378249.145	293.465
Everest(1830)	6377276.345	300.8017
Modified Everest	6377304.063	300.8017
Helmert 1906	6378200	298.3
Hayford 1909(International 1924)	6378388	297
Krassovski(1940)	6378245	298.3
Mercury 1960	6378166	298.3
Hough 1960	6378270	297
Australian National	6378160	298.25
South American 1969	6378160	298.25
Geodetic Reference System 1967	6378160	298.2471674273
WGS72	6378135	298.26
Geodetic Reference System 1980	6378137	298.257222101
WGS84	6378137	298.257223563

表-2 世界の主な測地系

測地系名	準拠楕円体	使用地域	変換パラメータ							文献
			dx(m)	dy(m)	dz(m)	rx(")	ry(")	rz(")	ds(ppm)	
Adindan	Clark 1880	エチオピア, マリ, セネガル, スーダン	-166	-15	204					5)
ARC1960	Clark 1880	ケニヤ, タンザニア	-160	-8	-300					5)
Australian Geodetic 1984	Australian National	オーストラリア	-134	-48	149					5)
Cape	Clark 1880	南アフリカ	-136	-108	-292					5)
CH1903	Bessel	スイス	660	14	369	0.805	0.578	0.952	5.66	10)
European 1950(mean)	International		-87	-98	-121					5)
European 1979(mean)	International		-86	-98	-119					5)
European 1987(mean)	International									6)参照のこと
GRS87	GRS80	ギリシャ								10)
Ghana	WGS84	ガーナ	0	0	0					5)
Guam 1963	Clark 1866	グアム島	-100	-248	259					5)
HD-72	GRS67	ハンガリー	-56	76	15	-0.37	-0.20	-0.21	-1.01	8)
Indian	Everest	タイ, ベトナム, バングラデッシュ, インド, ネパール	289	734	257					5)
Johnston Island 1961	Clark 1866	ジョンストン島	191	-77	-204					5)
KKJ	Hayford 1924	フィンランド								7)参照のこと
Luzon 1911	Clark 1866	フィリピン	-133	-77	-51					5)
New Zealand 1949	International	ニュージーランド								9)
North American 1927(mean)	Clark 1927	アメリカ合衆国, カナダ, 中央アメリカ, メキシコ	-8	160	176					5)
North American 1983	GRS80	同上	0	0	0					5)
NTF	Clark 1880	フランス	-168	-60	320	0	0	0	1	10)
Ordnance Survey of Great Britain 1936	Airy	英国	375	-111	431					5)
Potsdam	Bessel 1841	ドイツ	582	105	414	3.08	-0.35	-1.04	8.3	10)
Pulkovo 1942	Krassovski	ロシア								9)
RD/NAP	Bessel 1841	オランダ	565	50	466	0.41	-0.36	1.87	4.08	10)
RT90	Bessel 1842	スウェーデン	-424	80	-613	-4.40	1.99	-5.18	0.0	10)
South American 1969(mean)	South American 1969	南アメリカ諸国	-57	1	-41					5)
Tokyo	Bessel 1841	日本	-146	507	680	-18.3	0.3	-7.0	-1.01	3)
United Arab Emirates	Clark 1880	アラブ首長国連邦	-249	-156	381					5)
WGS72	WGS 72		0	0	4.5	0	0	-0.554	0.227	10)
WGS84	WGS 84		0	0	0	0	0	0	0	

(注) ①変換パラメータは、特に示されていない限り、各データムからWGS84への変換を行うときのものである。

②空白は0ではなく、文献に載っていないか、計算されていないことを示す。

③座標変換の式は、以下のとおりである：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{WGS84} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + (1+ds) \cdot \begin{bmatrix} 1 & rz & -ry \\ -rz & 1 & yx \\ ry & -rx & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{Datum}$$

部分的な改ざんを除くと大きな改訂はなく現在に至っている。

主な楕円体パラメータ及び測地系を表-1と表-2に示す。詳しくは、参考文献を参照されたい。

4. 新しい測量と測地系の動向

20世紀の後半になって、最も著しい技術的進歩は、人工衛星などの宇宙技術を用いた測量方法の発展であろう。宇宙測地技術によって初めてジオイドにとらわれずに地球の形を計ることができるようになったのである。人工衛星の軌道を解析することで地球の質量や扁平率が決定され、宇宙測地観測点の3次元的位置を正確に求めることにより地球の大きさ、回転速度等を極めて精密に測定することができる。2.で述べた新しい地球楕円体パラメータの決定は宇宙技術の成果である。

地球上の観測点の位置を宇宙技術で決定すれば、真の意味で測地座標系の構築が可能になる。この座標系は、必然的に3次元で、原点を地球の重心にとるのが最も合理的である。X軸、Z軸は、それぞれある時期の経度0度方向と自転軸方向にとる。地球上の点はプレート運動等によって日々動いており、自転軸の方向も一定ではないから、精密な座標系を作ろうとすると時間変化を考慮しなければならない。

このような座標系で最も有名なものは、最初にアメリカのDMA (Defence Mapping Agency, 現在はNIMA: National Imaginary and Mapping Agency) が発表したWGS系がある。WGS72, WGS84などがあり地球全体を記述できる座標系として広く使われている。さらに近年になって、IERS (国際地球回転事業) が地球座標を構築している。

IERSは、BIH (国際報時局) より地球回転に関する事業を引き継いだ国際組織で、国際天文学連合 (IAU) と国際地球物理学及び測地学連合 (IUGG) によって1987年に設立された。天体の位置を示す天球座標系 (ICRF: IERS Celestial Reference System) と地球座標系 (ITRF: IERS Terrestrial Reference System) を定期的に更新して発表しており (例えば、

ITRF93, ITRF94など), 学術的には、国際的に最も権威があるものとして認められているものである。

一方、発展する情報技術と世界的な航空、航海、運輸などに対応するため各国は自国の測地系とグローバルな地心系との変換パラメータを求めることを余儀なくされている。いくつかの例を挙げよう。

(1) 2.で述べたようにヨーロッパでは各国の測地データを統合した座標系を作っている (ED87) :

西ヨーロッパを12のブロックに分け、ブロックごとの網平均を結合したものである。宇宙測地技術のデータを取り込み、地心座標系との変換パラメータを求めている。ED87の座標軸は宇宙測地観測によって決定されたもので、ITRF系と同じものと考えてよい。観測数は、52,000、観測局は7,800、未知数は22,000に達する。

さらに、その変換の手間も省くため、地心系を自国の測地系に採用した例が北アメリカとオーストラリアである。

(2) 北アメリカ測地系 (NAD83) :

アメリカ、カナダ、中央アメリカ、グリーンランドでの観測データを用い、270,000点、180万個の観測方程式を解き、900,000個の未知数を求めた。ドップラー、SLR, VLBIのデータを含んだ地心測地系である。

(3) オーストラリア地心系 (GDA94) :

オーストラリア内の8つのGPS追跡局、付近の島々及び500km間隔で大陸をカバーする78個のGPS局の観測データを用い、ITRF92を基準座標系として世界の他のGPS局とともに解を求め、それを骨組みとした。骨組みを固定として、他のGPS局と従来測量点を網平均し、GDA94として5,000点の位置を得ている。

日本でも、現代の高精度な測量を行うと、明治以来の日本測地系が持つゆがみや誤差が無視できなくなる。特に、日本は地殻変動が激しく、過去の測地成果をそのまま使っているのは測量の基準としての役割を果たせなくなっている。さらに交通や運輸の国際化に伴い、世界的な座標系と整合のとれた座標値を提供することも必要である。国土地理院では、このような時代の要請に応えるべく新しい測地系の構築に向けて動き出している。

参 考 文 献

- 1) 現代測地学, 日本測地学会, 1994.
- 2) 測地学の概観, 日本測地学会, 1974.
- 3) 飛田幹男, 私信, 1997.
- 4) AUSLIG Geodesy, <http://www.auslig.gov.au/geodesy/>, 1997.
- 5) Dana, P. H., Geodetic Datum List, <http://www.utexas.edu/depts/grg/gcraft/notes/datum/dlist.html>, 1995.
- 6) Ehrensperger, W., The ED87 Adjustment, Bulletin Geodesique, 65, 28~43, 1991.
- 7) Finnish National Grid Coordinate System, <http://www.nls.fi/maa/papers/kkj.html>, 1996.
- 8) Hungarian Geodetic Reference, <http://lazarus.elte.hu/gb/geodez/>, 1995.
- 9) Rapp, H. R., Geometric Geodesy Part 1 & 2, The Ohio State University, 1991&1992.
- 10) Voser, S. A., Geodetic Datum Parameter Library, http://habicht.bauw.univw-muenchen.de/voser/bezug/datum_lib_txt.html, 1996.