

1800年前後の日本とフランス

伊能忠敬の子午線測量と
Delambre et Mechainによるメートル
の定義のための子午線測量

海津 優

2015/11/28
東京地学協会講演会

緯度の差と方位から座標を計算するという考えが、すでに漢代の中国にあったが、正確な暦の編纂には地球概念の受容が必要

我が国では南蛮人宣教師により地球概念が紹介され、儒者や僧侶の一部の抵抗を受けながらも受容が進み、1800年ころにはすでに暦の計算は球体の地球で行われていた

実は伊能忠敬の最初の測量は地球の大きさを決めるため、緯度1度当たりの子午線の長さを決めるためのものだった

伊能忠敬についてはすでに 多くの研究がある

大谷亮吉「伊能忠敬」
1917年出版の著名な研究書



これらは生誕250年、没後150年、
を記念して、東京地学協会で企画、
出版したもの

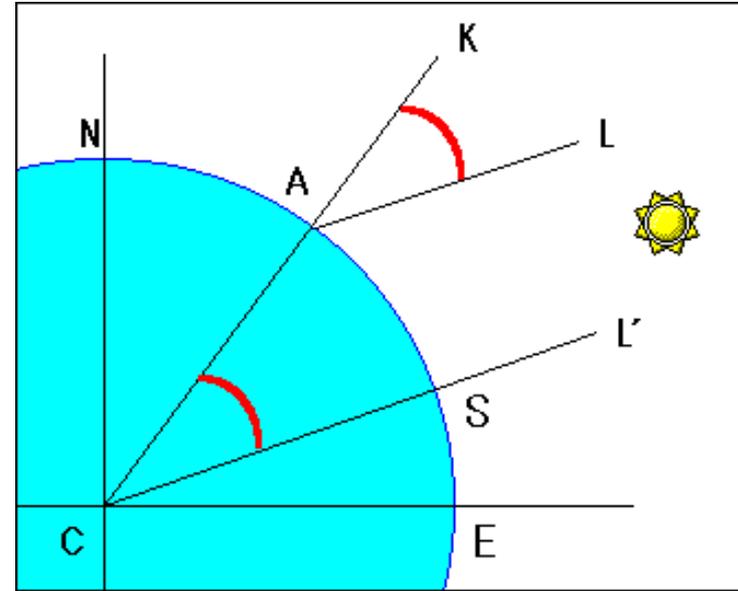
このほかにも数多くの研究があり、伊能忠敬を専門に研究する団体などもあるので、ここでは地球の大きさに関する測量に絞って、伊能が活躍した時代の日本と、そのころ1mを測量により定めたフランスの技術的状况を考える

子午線弧長(球の場合)

- 地球が球体であることを受容が前提
 - 緯度1度に相当する子午線の長さがわかると地球の大きさがわかる
 - 地球の大きさは暦の作成等に必要
 - 地図の作成のためにも必要
 - 地球のことは自らのよって立つ物のことだからそれ自体としても興味深い
- 古来各地で試みられた記録がある

古代から中世の子午線弧長測量

- ギリシャ
 - アレクサンドリアからシエネ
エラステネス (BC240頃)
- 中国
 - 鉄勒から交州
 - $\Rightarrow \tan(x)$ の表 (実は平面)
一行 (8世紀)
- イスラム世界
 - ジンジャーール平原
アル・フワリーズミ (9世紀)



「エラステネス (276?B.C. ~ 196?B.C)」
夏至の日にシエネでは井戸の底に陽が
当たるのに、北に5,000スタジオン離れた
アレクサンドリアでは太陽の高度角
が7度12分であることから、地球を球と
してその周は250,000スタジオン
(44500km程度)と推定した。

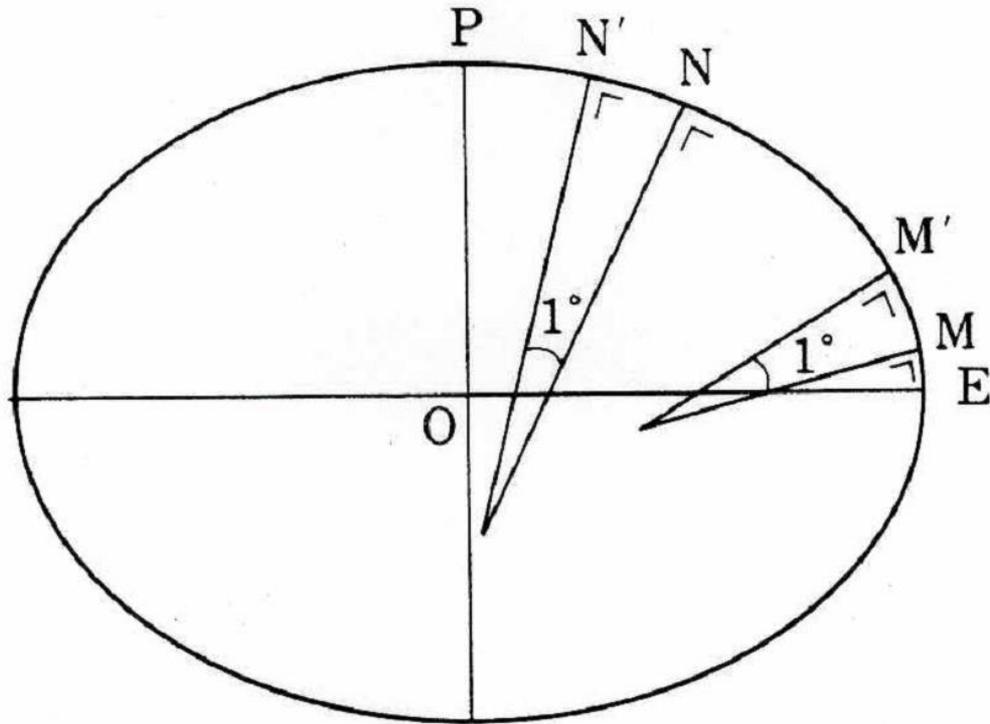
近代ヨーロッパ

- スネルの三角測量(1615年、最初のシステマティックな実用的三角測量)
- ニュートン(1687)とホイヘンス(1690)が力学的に地球が扁平であるべきことを主張
- カッシニ父子は1600年代後半から1700年代はじめのフランスでの測量結果から地球は南北に縦長であると主張
- 1735-1743年に、ブーゲ、モーペルチュイらフランスアカデミーによる、ラップランドとペルーにおける測量で地球が扁平であることが確定
- 1792-1799年に、ドランブルとメシエンが1mの定義のための測量
- 1816-1855年にかけて、スルーベの2820kmにわたる測地弧(スカンジナビア北岸から黒海までの長大な測地弧:世界遺産になっている)が測量された
- 他にも多くの子午線長の測量が行われた

1800年ころのフランス

- フランス革命の前後ではあったが、ルイ16世が始めた度量衡の統一を革命政府も目指していた
- ラグランジュ、ラプラス、モーペルチュイ、ムーニエなどの数学、天文学、物理学者を輩出、天体力学、微分幾何学、楕円関数論が発達していた
- ラランドがドランブルやメシェンのような優秀な測地学者を育てていた
- ピカールやカッシニ父子の伝統の下パリ子午線が繰り返し測量されていた

1度当たりの子午線長から 楕円体パラメータを決める



M E 極に近いと、接触円の半径が長いので、1度の弧長も長い

緯度による接触円の半径
(曲率半径)の変化を知れば、
赤道半径と扁平率を計算できる

現在では宇宙技術により、全球的に決定するが、1960年代までは子午線弧長で地球の形を決めていた

ラランドの「天文学」

(これのオランダ語訳がラランデ暦書)

- 地球の大きさと形に関する章には
 - 三角測量
 - リシェールによる緯度による振り子時計の遅れ
 - ホイヘンスによる遠心力で扁平になるという考え方
 - カッシニ父子の測量
- などが記載され、楕円体関連の式も載っている

ダンケルクーバルセロナ三角鎖

- ドランブルとメシエンらが 担当、1792-1798にかけて測量
- 1mを表示する板状のメートル原器が白金で作られた。この原器は、その保管場所である共和国文書保管所にちなみ、“アルシーブの原器”と呼ばれる
- パリ近郊と西仏国境付近に基線、これ以外は角度を測定した

「子午線弧長決定の解析的方法」

Delambreの著書

- 基線に関する記述
- 球過量の扱いと楕円体上への投影に関する記述
- 三角鎖の中の天文観測点の位置

など、測量に関する記述のほか、楕円関数の展開式など、処理に必要な数学を詳しく解説してある

ドランブルが求めた 楕円体のパラメータ

第一編 測地学 21

19. 其ノ他ノ楕圓體

人 名	年	長半徑 m	短半徑 m	扁平率	子午線上象眼 m
Delambre	1800	6 375 653	6 356 564	1 : 334.0	10 000 000
Svanberg	1803	6 376 567	6 356 018	1 : 310.3	—
Walbeck	1819	6 376 396	6 355 833	1 : 302.8	10 000 268
Bohnenberger	1826	6 376 605	6 356 213	1 : 312.7	—
Schmidt	1830	6 376 945	6 355 521	1 : 297.7	—
Airy	1830	6 377 491	6 356 184	1 : 299.3	10 000 976
Bessel	1841	6 377 397	6 356 079	1 : 299.2	10 000 856
Paucker	1854	6 378 324	6 356 323	1 : 289.9	—

陸軍陸地測量部
昭和14年版「測地便覧」
より

メートルの定義の変遷

- 子午線長の一千万分の一でメートルを定義
- 1870年アルシーブの原器でメートルを実現
- 1875年メートル条約締結
- 1885年日本メートル条約加入
- 1960年Kr86原子の準位 $2p_{10}$ と $5d_5$ の間の遷移に対応する光の真空中における波長の $1\,650\,763.73$ 倍に等しい長さとして定義
- 1983年真空中で1秒の $299\,792\,458$ 分の1の時間に光が進む行程の長さとして定義を変更
- いずれにせよ1mは元々測量で定義された

伊能忠敬による子午線弧長の測量

- 伊能忠敬による子午線弧長の測量
 - 第1回(江戸～厚岸)は1800年
- 手法は道線法と山あて(交会法)
- 欧州の三角測量に比して、間縄による距離測定と小方位盤による道線法では精度的にかなり劣ることはやむを得ない
- 地球の形についての知識?
 - ラランデ暦書を高橋至時が読んだのは1803年
- 球体を仮定しての計算←楕円体地球を意識するのはラランデ暦書以後
- 緯度観測を行い1度の長さを計算
- 緯度観測には大気による光の屈折を考慮

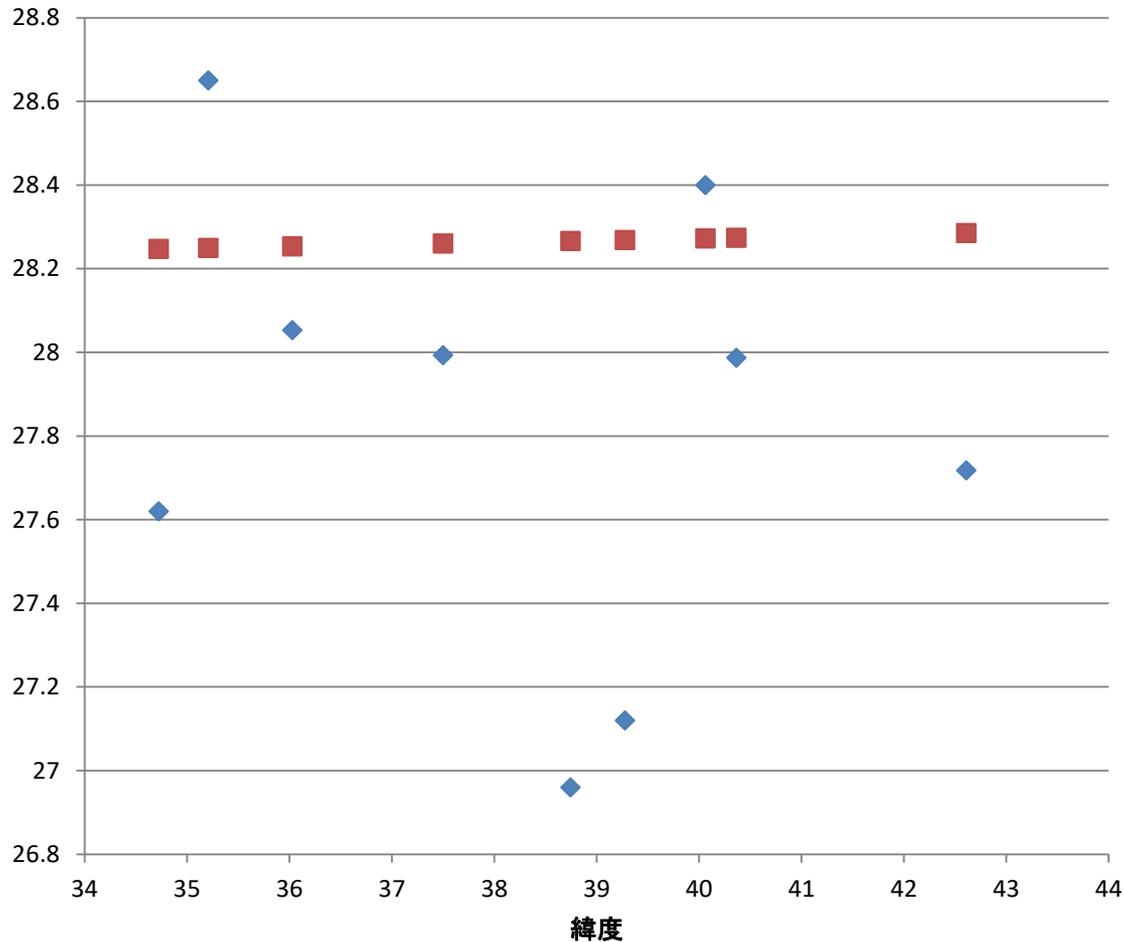
伊能忠敬「測地度説」

多くの星を観測して天の北極の高度角を計算し、
2点の北極高と南北の距離から子午線の曲率を計算

このような計算を各地で丹念に行っている。

結果が区間ごとに記載されているので、ばらつきも確認できる貴重な資料
(国会図書館蔵のデジタル化した画像をインターネット経由で閲覧できる)

GRS80の子午線弧長との比較



道線法と三角測量

伊能忠敬による道線法

- すべての辺で距離測定
- 張力、湿度、温度、傾斜、による誤差、懸垂線と直線の違い等、多くの誤差要因
- 小方位盤は1度目盛
- 局所的に平面問題として処理
- 交会法で誤差を確認

フランス隊の三角測量

- 三角測量なので、距離測定は基線2辺のみ
- 水平角の測定は精度よく可能(当時)
- ボルダの円環により1秒で読み取り
- 球過量を考慮
- 三角形なので個別に閉合条件がある
- 海面への投影も行っている

計算処理

測地度説

- 地球を球として1度の里数を計算
- 星の高度角は多数の星を観測することで気差を軽減
- 1度の里程を28里2分とする⇒天保の改暦の基礎

子午線弧長決定の解析的方法

- 楕円積分を級数展開して測定値に当てはめ
- 5か所で天文観測を行い、三角鎖で結合
- この結果をもって1mを定義⇒世界における度量衡統一への第1歩

地球の形に関する伊能忠敬の業績

- 日本地図はもちろん重要な成果である
- 地球の大きさが正確にわからないことによる暦の問題(日食や月食の予報が外れる等)を解決するため、地球の大きさを長距離の子午線を実測することで推定した
- 伊能の子午線測量は1mの定義のためのフランスアカデミーの測量とほぼ同時期である
- 測器を工夫し、緯度の測量で規正することで、道線法と交會法という古風なやり方でありながら、かなり正確な数値を得ている
- 長距離で精度の落ちにくい方法で規正するのは近代測量と同じ考えかた⇒経度の測量がうまくゆかなかったため、東西には少し歪んだが、それ以前とは段違いの地図が描けた
- それにしても、鎖国という厳しい条件下であったため技術的には欧州に100年程度の遅れを取っていた
- 漸進的改良でかなりのところまで行けるのは、天動説の周転円などでも知られているが、やはり画期的な変化についてゆかないと早晚進歩から脱落する⇒新たな視点、新技術は大切
- しかし、時代の条件の中では素晴らしい成果を残した

測量にとっての世紀末

- 1700年前後はプロイセン王国が成立し、実用的地図作成が始まるころ →その後日本の陸地測量部に影響
- 1800年前後は度量衡の革命の年
- 1900年前後は相対論と量子力学の誕生、物理学の革命の年→光波測距、GNSSなどの基礎ができた
- 2000年は将来どう評価されるのだろうか
 - GNSSの一般化と測位の大衆化
 - ポケット端末に配信される数値地図の大衆化
 - 写真測量の大衆化⇒測量が大衆化し始めた時期として記憶されるのだろうか？
 - それとも何か同時代人では気づかない大きなことが起きていたのだろうか？

参考文献

- Delambre, J. B. J. (1799): *Méthodes Analytiques pour la Détermination d'un Arc du Méridien*; précédées d'un mémoire sur le même sujet par A. M. Legendre, De L'Imprimerie de Crapelet, Paris
- Lalande, J.J.F. (1792): *Astronomie (Tom.3)*, Chez la veuve Desaint, De l'imprimerie de P. Didot l'ainé, Paris
- 大谷亮吉(1917): 伊能忠敬、岩波書店
- 保柳睦美(1974): 伊能忠敬の科学的業績、古今書院
- 東京地学協会(編)(1998): 伊能図に学ぶ、朝倉書店
- 陸地測量部(1940): 測地便覧、陸地測量部
- 伊能忠敬(1801): 測地度説、国会図書館蔵
- 嘉数次人(2005): 天文方のラランデ天文所研究、天文月報、2005年5月