伊能忠敬による月食観測を用いた経度測定とその精度

野 上 道 男*

Lunar Eclipses Observed by Inoh Tadataka and the Longitude

Michio NOGAMI*

[Received 21 January, 2019; Accepted 24 June, 2019]

Abstract

In order to measure the longitude difference between two distant sites, Inoh Tadataka and his technical team observed three lunar eclipses when surveying the Japanese Islands at the beginning of the 19th century, and left some observation records. The local times when the partial eclipses began and ended were measured with a pendulum clock. By introducing the equation of time to the calendar date of the observations, the time difference can be obtained between the local time observed by Inoh and the lunar eclipse timetable of NASA shown in Japanese Standard Time at 135E degrees of longitude. Consequently, the accuracy of the longitude survey performed by Inoh Tadataka is evaluated in comparison to the precise map of the Geographical Survey Institute.

Key words : Inoh Tadataka, lunar eclipse, longitude, equation of time, pendulum clock

キーワード : 伊能忠敬, 月食, 経度, 均時差, 垂揺球儀

I. はじめに

経度測量のための月食観測法や成果の解釈にかかわる基本的な器具と概念などをこの章で整理しておきたい。最初は均時差である。伊能の観測当日の均時差の値がないと、日本標準時 (JST) で記述されている月食表との比較によって、伊能の測量精度の検討ができない。

次に時差が経度差であることに鑑み、天文現象の発現を太陽の南中からの時刻で測る振り子時計 (垂揺球儀) について述べる。これは経度差の測定にかかわる重要な機器である。なお次の第II章では、伊能が経度を知るために月食・日食・木星の衛星の掩蔽の観測を行っていたとの通説に対して、そのうち日食については天文学的同時現象

ではないので、同時観測をしても、食分の時刻観測結果だけでは経度の計算が不可能であることを検討し、この短報では経度測定法として扱わないことを述べている。

1) 均時差と時差 (経度差)

伊能による日食・月食・木星の掩蔽についての観測は垂揺球儀によるその地点の午正 (太陽の南中) からの時刻で行われている。南中の時刻 (JST) はその地点の経度によって異なる。1 太陽年のなかで太陽が等速で動いているとする架空の「平均太陽」による「平均太陽時」 (東経 135 度の値が JST) で測ると、日々の太陽の南中時刻 (視太陽時) は季節変化している。この時間差が均時差である (図 1)。この均時差の季節変化グラフは国立天文台暦計算室が公表している (均

* 東京都立大学名誉教授

* Emeritus Professor, Tokyo Metropolitan University

図 1 均時差の季節変化 (国立天文台による)。

Fig. 1 Seasonal changes in equation of time (Source: National Astronomical Observatory).

時差および国立天文台暦計算室は Web 検索のキーワード)。

均時差がマイナスのとき、東経 135 度 (以後 135E) では JST の午後に南中が起き、プラスのとき、午前に南中が起きる (ただし正負は定義)。

2019 年版理科年表 (国立天文台, 2018, 暦 4-26) で見ると、均時差の最大は 11 月 4 日に +16 m 27 s (東京では 11 h 24 m 35 s に南中。年表には示されていないが 135E においては 11 h 43 m 33 s に南中ということ)、最小は 2 月の 12 日に -14 m 14 s である。前年と同じ日付 (グレゴリオ暦) であっても均時差は等しくない。とくに閏年の 2 月 29 日の次の 3 月 1 日は前年の 3 月 1 日との差は大きい。さらに 1700 年, 1800 年, 1900 年は平年, 2000 年は閏年である。これらのことを考慮した上で、この短報でとりあげている過去の月食日の均時差を次のように推定した。南中は 135E の値 (JST)。

1796-Dec-14	+5.8 分	南中	11 h 54 m	ごろ
1802-Mar-19	-8.3 分	南中	12 h 08 m	ごろ
1812-Aug-22	-2.9 分	南中	12 h 03 m	ごろ
1815-Dec-16	+4.9 分	南中	11 h 55 m	ごろ

これらの値はグレゴリオ暦法と均時差の原理に基づく計算値ではなく概算した推定値である。均時差は日付が 1 日ずれると最大 30 秒近く変わる季節があるので、その程度の誤差があると思われる。この値は直接経度の計算にかかわり、ここで生ずる時間差の 1 分は経度差の 0.25 度に相当す

る。ただしこの精度は NASA の月食表の精度でもあるので、この程度の推定値でも十分であると考えられる。

緯度の観測は 1 地点で完結するが、当然のことながら経度には物理的起点がないので、2 地点間の経度差 (時差) だけが問題となる。ここでとりあげる月食記録のうち 2 つは 1 地点だけの記録しかない。これについては NASA の月食表 (JavaScript Solar Eclipse Explorer) (NASA および JavaScript Solar Eclipse Explorer は WEB の検索キーワード) のデータとの比較で精度を検証する。この月食表は日本標準時 (JST) で示されている。つまり 135E と伊能の観測地点間の経度差を検討することになる。その 2 つのうちの 1 つは、享和 2 年 2 月 16 日 (1802-Mar-19) の部分月食で、江戸深川黒江町 (139:47:40E, 地理院地図) で観測され、もう 1 つは文化 9 年 7 月 16 日 (1812-Aug-22) の皆既月食で、九州小倉船頭町 (130:52:46E) で観測が行われた。この 2 つの観測については、その日に均時差がいくらであったかの推定値を加えた上で、その地点の視太陽時による観測時刻と 135E からの時差 (つまり経度差) を検討することになる。

文化 12 年 11 月 16 日 (1815-Dec-16) の皆既月食は下田 (138:56:40E) と江戸本局 (浅草司天台ともいう。ここでは差し支えない限り暦局に統一。139:47:19E) での観測記録が残されている。このように 2 地点間の時差 (経度差) だけを検討するとき、均時差は相殺される。同時現象 (月食など) を観測し、2 地点間の地方時の時差を知ろうとするのが伊能の方法である。さらに均時差を推定し NASA の月食表のデータと比較すれば、2 地点の 135E とのそれぞれの経度差を検討できる。これによって江戸・下田の 2 地点における観測値誤差を分離して比較できる。

NASA の月食表は時 (h) と分 (m) で示されている。したがって均時差の季節変化も分 (m) の整数値で推定できればよいといえる。

伊能の測量法は導 (道) 線法と呼ばれる。測線の方角を磁針方位盤で計り、長さを間縄で測る。これを次々に繰り返す方法である。このとき長さ

を方位で東西成分と南北成分に分解し、これを加算して東西位置・南北位置の座標を定めている。これは地上における細部測量であって、地図のフレームは天文測量（恒星の子午線通過時の高度）で測られた緯度である。経度は携行できるクロノメーターがなかったので、天文測量では測れなかった。しかし、機会は少ないが、天文学的同時現象（月食や木星の衛星掩蔽）の時刻を垂揺球儀で観測し経度を測ることを試みている。

2) 垂揺球儀による時刻測定

垂揺球儀とは振り子時計のことである。力学的原理では振り子の行数は、振幅や錘の質量に無関係で（空気抵抗を通じては関係）、その場の重力加速度（ g ）と振り子の力学的長さだけで決まっている。

周期 T 、長さ L 、重力の加速度 g (9.8 m/sec^2) とすると、

$$T = 2\pi\sqrt{L/g} \quad (1)$$

この式による値の目安として、支点から錘の重心までの長さが 24.8 cm で、1 往復（周期）が約 1 秒となる。垂揺球儀について大谷（1917, p. 411）は「1 球行即ち振子の 1 全振動数を以て最小の単位となし」と述べている。わかりにくい表現であるが、これが 1 行という単位である。大谷（1917, p. 406）は伊能家に存在する垂揺球儀の実機について、1 日約 59500 行で長さ約 1 尺 8 寸という寸法を記載している。この場合 1 行は 1.4521 秒 であるので、これを周期とする長さは約 0.524 m であり、約 1 尺 8 寸という記述とあっている。錘を下げる金属線の長さは温度変化するはずであるが、それが無いという仮定で使用されている。

垂揺球儀の表示機構については大谷（1917, p. 398-412）に詳しい紹介がある。垂球の行数を機械的に数え、歯車を使って桁ごとに読みとれるようになっていた。また嘉数（2008）も揺垂球儀とそれを用いた天体現象が起こった時刻を知る方法を解説している。当時の垂揺球儀が和製であることに間違いはないが、その機構が独創であるか西洋の模倣であるかについては小曾根（2011）の

考証がある。

1 日当たりの行数が同じになるように垂揺球儀を製造することは当時の技術ではできなかったもので、1 台ずつ異なる行数となっていたようである（後述）。また伊能は観測日に数日先立って垂揺球儀を動かしているの、垂揺球儀を運搬し、組み立て直したとき、前と同じ行数となるという保証もなかったと察せられる。大谷（1917, p. 406）によれば錘までの長さは 1 寸程度の幅で調整できるような構造になっているとされるが、それを使って 1 日の行数をあわせようとはしなかったし、不便ではあるが次に述べる理由によって必要もなかった。ちなみに 1 日（午中から次の午中）の行数は 34438（大谷, 1917, p. 400）、59657（表 1）、59797（表 2）、56827.5（嘉数, 2008）などの例が記録に残っている。行数では 1（周期）または半（振れの片道）が最小読みとり値である。

江戸時代の天文観測では、太陽の午中（南中、子午線通過）から次の午中までの 1 太陽日の垂揺球儀の行数を数えて、それが 10000 分（ぶ、24 時間制の分ではない）になるように比例計算で基準化し、時刻を示していた。10000 分（ぶ）= 86400 秒（1440 分ふん）である。それを 5000 ずらして子正を基点とすることもある。経度差 1 度は時差 4 分（ふん）で、27.7778 分（ぶ）である。なお『寛政暦書』（国立国会図書館デジタルコレクション）巻 33 では一二支・刻・分・秒という単位も使われている。巻 34 では 24 時間制の時・分・秒である。

計算値としては 24 時間（= 86400 秒）で 59657 行の場合、相対値 1 分（ $1/10000$ 日）= 8.64 秒、1 行 = 1.44828 秒である。伊能はネピアの小数点表記を知らなかったが、相対値 1 分の $1/100$ （0.0864 秒）まで計算している。

垂揺球儀による天文観測は、大谷（1917, p. 399）によれば天明 2 年（1782 年）大阪（伊能図では旧字「坂」）の麻田剛立（妥彰、高橋至時と間重富の師）が月出帯食の観測に用いたのが最初（の記録）とされている（後述するように裏付けはとれない。大谷の誤りではないか）。この月食は、NASA の月食表で調べてみると 1782-

Sep-21 の部分食で、20 h 45 m から 01 h 49 m まで続き、食の中心時刻は 23 h 17 m、高度 53 度であった（NASA が示す時刻はすべて JST）。

伊能は月食や日食あるいは木星の衛星掩蔽を観測するとき、数日前から観測地に滞在して太陽の南中を観測し、垂揺球儀のキャリブレーションを行っている。なお恒星の南中や北中観測も行っているが、得られるのは恒星日（同じ恒星の南中から次の日の南中までの時間）であるので、太陽日に換算する必要がある。

月は平均して 29.5305889 日かけて太陽を追いかけている。つまり太陽との角度は 1 日につき 12.19075 度ずつ、1 時間につき 0.50795 度ずつ変化する（いずれも平均値）。この精度で太陽の南中と月の南中の時角を測量できれば経度を知ることができる。また月は恒星に対して平均して 1 日約 13.2 度動くので、1 時間について約 0.55 度動くことになる（青木, 1982, p. 126）。

伊能は六分儀のような角度測定器をもっていなかったもので、2 つの遠方の山への見通し線の磁針方位測量を行っても、その内角を直接測ることはしなかった。山の位置の測量は前方交会法によっており、三角測量ではなかったもので、内角の角度測量は必要がなかったと思われる。しかし計算では、磁針方位値の差としてその値を得ることはできる。伊能の方位は一二支で表され、30 度を 30 分割して「分」（ぶ）としているので、「分」とは 360 度法の「度」である。大谷（1917, p. 265）が示している伊能の方位測定値で見ると、方位の読みは最詳 5/60 度である。方位の差をとれば磁気偏角は消去される。

伊能は経度を知る目的で月と恒星の角度などを測っていないが測るとしたら、同じ方法で同じ機器で測るので、5/60 度という読みの精度はそのままである。これを経度についての値と見なすと、経度 1 度の時角が 240 秒であることから、5/60 度という角度の読みの精度は時角では 20 秒相当となる。前述したように垂揺球儀の 1 行 = 1.44828 秒という例からみて、角度の測定に較べて時角の測定は 10 倍ほど精度がよいといえる。

六分儀などによる天体間の角度測定の精度以上

に、垂揺球儀を使って時角差を測定できたのであるから、伊能も師の高橋至時も月距法（lunar distance method）を知らなかったと推定できる。ただしこのことについてはさらなる考証が必要である。

II. 2 地点における日食観測（伊能の方法）だけでは経度差の計算は不可能であること

月食は地球の陰が月面に落ちる現象であり、月が見えさえすれば、どこから見ても同じ現象を同時に見ていることになる。したがって観測で用いられた地方時の差（太陽の子午線通過の時間差）がわかる。この原理は『寛政暦書』巻 8（月食暦理一）に「凡東西差 1 度則時差 27 分余」と述べられている。つまり 10000 分（ぶ）= 24 時間であるので、経度差 1 度 = 27.7778 分（ぶ）となるということである。

ところが、日食は月の影が地球に落ちる現象であり、場所によって日食の有無も含めて、食分は異なり、仮に同じ食分が見られたとしてもそれは JST で同時ではない。別の表現で繰り返すと、月食はどの観測点においても、同じ食分の時刻は JST で表せば同じ時刻となる。それに対して、日食は観測点によって JST で表した時刻が異なる。したがってこの単純な理由によって、日食は月食と同じ方法では経度の測定に使えない、と考え、この短報ではとりあげないことにした。その理由を以下に述べる。

大谷（1917, p. 445）は、「高橋至時は既に寛政 10 年（1798 年）10 月の頃同月朔の日食観測材料により江戸、大阪の経差を 17 分 05 秒即ち 4 度 16 分余と算出し」と述べている。朔にしか日食はあり得ないので、「朔」と「日食」という記述には誤植はない。ちなみに地理院地図で読むと、江戸浅草橋三丁目の暦局（司天台）は（139:47:19E, 35.42:06N）、大阪の間重富邸は（135:29:33E, 34.40:33）で、経度差は 4 度 17.8 分である。大谷が示した値は地理院地図で読んだ経度と 2 分以内の差しかなく、十分な精度であるといえる。しかし日食によるとされる、それ以上の根拠を大谷は示していない。前出の引用文は、

大谷が2地点の日食観測材料だけで経度差が計算できると確信している記述である。しかしこれは大谷の勘違いであろう。なお、同じ1798年10月の16日（グレゴリオ暦11月23日）には部分月食があった。

また大谷（1917, p. 427）は、寛政暦法に採用された日食法を応用して経度差を計算したのであろう、と述べている。つまり経度差の計算方法はあるはずであるが、その実測記録がないので、その方法は示せない、としている。しかし仮に日食の食分と時刻（視太陽時）の実測が2地点で行われても、原理的にはそれだけのデータでは以下に述べるように経度差を計算する方法はない。

日本では中国暦との里差（経度差）が問題とされたのは渋川春海の貞享暦（1685-1754年）からであり、それから可搬クロノメーターが使えるようになるまでの短い期間だけ、天文同時事象（月食や木星衛星掩蔽など）が経度測定法として用いられた。伊能の時代はまさにこの期間に相当する。

渡辺（1994）の『日食・月食宝典』第1編第3章（p. 45-64）は「某地点の日食状況の推算」となっており、「時刻を与えて食分の計算」を行う内容となっている。これは緯度経度既知の点に時刻を与えて食分を計算する例である。この計算式（群）から、逆に2地点について、同一「食分」時の時刻差を与えて、2点間の経度差を計算する式を誘導することはできないと判断される。伊能の観測は江戸暦局と同一日の食分と垂揺球儀による視太陽時だけである。

一般に、日食観測では、既知の場所（緯度・経度）で、食分と時刻などが観測されるが、逆に経度を知るといった目的が意味をもつのは、前述の短い期間だけであった。したがって、渡辺（1994）やその他の古天文現象を扱った文献に、日食観測の目的を経度観測とする事例や方法が述べられていないのは当然ともいえる。

ところで、日食観測によって経度を知る方法がないわけではない。国立天文台天文情報センターの（2017年11月21日付け）教示によれば、日食の開始（初虧）と終了（復円）の時刻の等時線地図（例えば、2016年版天文年鑑 p. 45 では5

分おきの値）があれば、観測された日食の開始・終了の時刻、あるいは観測された緯度から観測点を特定できる、という。つまり日食の開始と終了の時刻の等時線地図から、差をとって日食の継続時間の等値線の地図をつくることができる。

この継続時間には、均時差と経度差は関係しない。そしてこの地図では、観測で得られた継続時間の等値線と、同じく観測で得られた緯度線との交点が観測点の位置（経度）となる。この方法によれば、食の開始・終了の地方時の観測値から、経度を計算できる。確かに伊能は星測によって日食観測地点の緯度を知っていたし、垂揺球儀で継続時間の観測もできていた。しかし日食の等時線地図や継続時間の等値線図が、当時は当然のことながら、存在しないので、伊能の日食観測値だけでは経度を知ることはできないのである。さらに当時の知識では、日食の持続時間の等値線地図をつくるという発想もなかったはずであるし、それは電算機を使用しなければつくれない地図である。

上に述べたように、「方法がない」ことを証明することは難しいが、経度差測定法としての2地点日食観測はあり得ないと判断している。そこで、記録として残されている観測値についても、成功例があるかないか調べてみた。

伊能と同時代を生きた天文学者である麻田剛立・高橋至時・間重富・渋川景佑らが関与した『寛政暦書』に多数の交食観測記録が残されている（渋川ほか、1844）。巻33の見出しには「古測交食校下」とあり、元禄13年（1700年）正月の日食から寛政8年（1796年）11月16日の月食まで、過去の観測値と寛政暦法による計算値が掲載されている。つまり寛政暦法による計算値を過去の観測値と比較して、暦法のキャリブレーションを行っている。内訳は月食32、日食19である。このうちには「当食不食」が含まれている。「当食不食」は中国正史の天文志などにある用語で、暦法（予報）では食があることになっているが、観測したところ、食はなかった、というケースの定型的表現である。ここでいう暦法とは「宝暦」暦である。なお宝暦暦から寛政暦への移行は寛政

10年1月1日(1798年2月16日)である。

『寛政暦書』巻33の食の観測記事のうち、江戸からは離れた地点で行われた麻田妥彰(剛立)による観測があるものを抽出した。麻田の観測値の初出は豊後杵築で行われた宝暦13年(1763年)9月朔である。以後、明和2年(1765年)7月望、明和3年正月望、明和4年正月朔・6月16日、明和5年(1768年)11月15日・12月朔の観測は豊後杵築で行われた。麻田は1769年ごろ、あるいは1771年ごろ、あるいは安永2年(1773年)に杵築藩を脱藩し大阪に居を移したとされている(文献不詳)。なお大阪府立中之島図書館のレファレンス協同データベースによれば、麻田剛立の先事館の跡は大阪市中央区本町三丁目付近、間重富の住居跡は大阪市西区新町二丁目付近、とある。

大阪での麻田の観測としては、安永3年(1774年)8月朔、安永4年8月朔・閏12月朔、安永5年12月14日、安永6年6月16日、天明4年(1784年)7月朔・7月15日、天明5年7月朔・12月15日、天明6年正月朔・11月15日、寛政元年(1789年)10月朔、寛政5年(1793年)7月15日(間重富の名あり)、寛政6年12月朔、寛政7年12月朔、寛政8年5月15日・11月16日がある(以上は当食不食を含む)。

なお前述したように、垂揺球儀による天文観測は、大谷(1917, p. 399)によれば天明2年(1782年)大阪の麻田によるものが最初とされるが、『寛政暦書』の8月15日の記録には、大阪の観測値は見当たらない。

高橋至時が麻田に入門したのは1790年ごろ、江戸の天文方への出仕は1795年である。そして、伊能が高橋に弟子入りしたのも同年である。したがって伊能が暦局ではじめて目にした天文観測は、上記のうち、寛政7年(1795)12月の日食であり(大阪の記録なし)、翌年の寛政8年5月15日(当食不食)と11月16日(大阪の記録あり)には暦局で月食観測の補助員となっていた可能性がある。

寛政8年(1796年)11月16日の江戸(暦局)および大阪(麻田)における部分月食観測記録

(『寛政暦書』巻33)とNASA(1796-Dec-14)の月食表の値をそれぞれ次に示す。

初虧：亥5刻01分、亥5刻02分、22:05

食甚：子1刻12分、子1刻56分、23:16

復円：子6刻65分、子6刻45分、00:28

なお当日の均時差は(地方時の時差の計算では相殺されるが)+5分45秒ごろと推定され、江戸での南中は11時36分ごろ(JST)、135Eでは11時54分ごろと推定される。江戸と大阪の視太陽時の観測値(食分ごとの差)を見るに、このままの値を使って平均値を計算できるような精度ではないことが一見してわかる。一般に月面における地球の影は地球大気のため不鮮明であり、食分の認定には誤差が大きい。

前述した大谷(1917, p. 445)による、「経差：17分05秒即ち4度16分余」という値は日食観測による値(後述の表1寛政10年10月)でないことはもちろん、寛政8年(1796年)の1回だけの月食観測値から得られた値でもない。ただし過去に大阪と江戸で8回行われた月食観測で得られた平均値である可能性は残されている。

寛政改暦に先立って、大阪と江戸で9回、日食の同時観測が行われている。そのうちには垂揺球儀による精密な時間測定が行われていないものもある。経度計算が容易な月食観測も8回も行われていたのであるから、日食観測は、大谷(1917, p. 445)の記述に反して、経度を計算することには使われなかったと思われる。いずれにせよ、大谷(1917, p. 445)の記事は誤りであるか、根拠が不明確であり、あるいは、はじめから計算方法がなかった、とも考えられる。

「方法があること」を示すには1つでも成功例を示せばよい。しかし以下に示すように成功例は発見できなかった。ちなみに検討対象とした『寛政暦書』巻34(新測定交食校)には改暦以来の交食観測記録が載せられている。寛政10年(1798年)8月朔、寛政12年3月16日、寛政12年4月朔、享和2年(1802年)2月16日、享和2年8月朔、文化元年(1804年)6月16日、文化元年12月15日、文化4年(1807年)10月16日、文化6年9月15日、文化7年3月

表 1 NASA 日食表による大阪と江戸の日食時刻.

Table 1 Solar eclipse time at Osaka and Edo (JavaScript Solar Eclipse Explorer).

日付	食分	大阪	江戸	差 (m:s)
寛政 10 年 10 月 1 日	部分食開始	8:40:18	8:40:07	-0:11
1798-Nov-08	食甚	9:41:59	9:47:12	5:13
伊能は自宅	部分食終了	10:48:09	10:59:01	10:52
寛政 12 年 4 月 1 日	部分食開始	7:13:07	7:26:53	13:46
1800-Apr-24	食甚	8:41:17	8:47:45	6:28
伊能は自宅	部分食終了	10:09:47	10:19:01	9:14
享和 2 年 8 月 1 日	部分食開始	15:52:44	15:53:50	1:06
1802-Aug-28	食甚	17:07:14	17:05:54	-1:10
伊能は能代	部分食終了	18:13:56	18:10:46	-3:10
文化 5 年 10 月 1 日	部分食開始	10:18:21	10:21:11	2:50
1808-Nov-18	食甚	11:10:41	11:18:33	7:52
伊能は塩飽泊浦	部分食終了	12:04:14	12:16:36	12:22
文化 7 年 3 月 1 日	部分食開始	9:46:38	9:52:05	5:27
1810-Apr-04	食甚	10:34:28	10:44:46	0:18
伊能は鳩浦：大分県	部分食終了	11:24:09	11:38:59	14:50
文化 11 年 6 月 1 日	部分食開始	15:50:05	15:55:45	5:40
1814-Jul-17	食甚	16:41:05	16:41:26	0:21
伊能は自宅	部分食終了	17:28:16	17:24:08	-4:08
文化 12 年 6 月 1 日	部分食開始	6:50:59	6:57:41	6:42
1815-Jul-07	食甚	7:13:24	7:17:01	3:37
伊能は不参加	部分食終了	7:36:32	7:36:50	0:18

大阪：間 重富邸 135:29:33E 34:40:33N.

江戸：浅草暦局 139:47:19E 35:42:06N.

朔，文化 11 年（1814 年）6 月朔，文化 12 年 6 月朔，文化 12 年 11 月 16 日，文化 13 年 10 月 16 日，文化 14 年（1817 年）4 月朔，＜中略＞天保 14 年（1843 年）11 月朔。ちなみに伊能は文化 15 年 4 月 13 日（1818 年 5 月 17 日）に死没した。また天保 15 年（1844 年）1 月 1 日に天保暦に改暦されている。つまりこの巻の交食記録は寛政暦施用期間中の観測記録ということになる。

そこで，寛政 10 年（1798 年）の日食のほかに 6 例をとりあげ，NASA の日食表（JavaScript Solar Eclipse Explorer）で大阪と江戸の日食データを書き出してみた（表 1，時刻は JST）。この 6 例は 1798 年から 1816 年までの期間に日本で見られた日食の全部である。「時刻差」の項は同じ食分について，江戸の時刻から大阪の時刻を引いた値である。マイナスの値が 4 つ認められるが，同じ食分の時刻が（逆に）江戸の方が先

であるという意味である。

伊能が日食観測で測定したのは，食分ごとの時刻（ただし視太陽時）だけであることに間違いはないであろう。日月食の方位と高度も観測したかもしれないが，磁針方位測量の精度は低い。この表 1 の「時刻差」とその日の均時差（ただし両地点で同じ値，引き算で相殺される），それぞれの点の緯度（これは星測によって既知である）から大阪と江戸の経度差が計算できるだろうか。この 7 例（期間の全例）について見るに地点間の「時刻差」はあまりにも不規則で，この値だけから経度差計算が可能だとはとうてい考えられない。

もちろんこれは日食観測で経度差を得ることできないという一般論の命題の根拠とはならない。しかし，この 7 例は伊能の測量期間のすべての日食である。したがって少なくとも，伊能は日食観測によって経度を知ることとはできなかった，と

いうことの論理的証拠にはなる。

以上に述べたように、大谷（1917, p. 427）が、日食による経度測定成功例を示さずに、また『寛政暦書』のデータでも計算できないのに、日食を月食と同じように経度測量に使えと記述したため、それ以後日食も同列に扱われることになった。大谷以来のこの通説は誤りである。

確かに伊能は日食を月食と同じように、むしろ日食観測の方を重視しているかのように、観測地（泊宿）で日時を費やしている。『伊能忠敬測量日記』（以後『日記』）によると、例えば享和2年（1802年）8月能代で通算12日、文化5年（1808年）10月塩飽本島泊浦で5日間、文化7年3月鳩浦（大分県）で5日間、文化12年（1815年）5月八丈島大賀郷陣屋近くで4日間滞在した（伊能は不参加）。

大谷だけでなく伊能自身も日食を月食と同列に扱っていた可能性は大きい。しかしそうではなく、2地点の日食観測では経度差は得られないことを伊能が知っていたとしたら、公儀の地図作成という名目で、つまり愛すべきずるさで、趣味の天文観測を行っていたことになり、その成果は御用の飛脚によって師の天文家高橋至時に報告されている。報告を受けた高橋至時も江戸の観測データと伊能の観測データだけでは経度差を計算できないことを知っていたはずである。もちろん現在では観測点の緯度経度が十分な精度で知られているので、緯度・経度を指定すればNASAの日食表との比較で、伊能の日食観測精度を検討できる。もちろん当日の均時差の値は必要である。

この項に示した論理と実測データから、伊能が日食観測によって経度を得ることはできなかったと判断し、この短報ではとりあげないことにした。

III. 江戸伊能自宅における享和2年 （1802年）2月の月食観測

江戸（III章）と小倉（IV章）の観測は伊能の単独観測であり（大阪と司天台の記録は未発見）、2か所の同時観測による地方時の時差（経度差）の値は得られていない。そこで、135E（JST）において誤差のない観測が行われた場合

との時差・経度差という形で伊能の観測精度を検討した。

佐久間達夫が、「平成17年1月1日発行という日付はあるが、発行所が自宅になっている私家本『伊能忠敬』（p. 95-96）」で紹介している、垂揺球儀を用いた月食観測の例（「雑録」、伊能記念館蔵）をここに再録する。この「雑録」のデータを用いた計算表や記述は大谷（1917, p. 411）にある。佐久間（2006）も同じデータを使って同じ計算をしている。ただし佐久間（2006）において「日法八六四〇〇〇秒とすると」と「その計算式」では0が1つ多い。しかし計算結果はあっている。大谷も佐久間も「子正後の時刻は、21時44分14秒となる」と述べている。この短報では小数点以下3桁目を四捨五入しているので、整数計算の大谷や佐久間の結果と若干の差があるがこれは問題ではない。大谷の検証は月食の地方時を求めたことで終わっている。

江戸の正午（南中）が135Eにおけるそれとどれ位ずれているかはまさに経度の問題であるが、135Eにおいて、その日（1802年3月19日）に平均太陽時（JST）の何時に南中していたか（均時差）を推定しないと、このままでは日本標準時で記述されているNASAの月食表と対応させて、伊能の測量精度を検証することができない。

この年に行われた第三次羽越測量の出発は6月11日であり、2月の月食観測は自宅で行われた。この観測は同時に大阪でも間重富が行っていた可能性があるが、記録は見つかっていないようである。

1802年2月16日（グレゴリオ暦3月19日）月食について、当日の太陽午中（南中）の観測に失敗したので、「星行を以てこれを補う」とある。要するに恒星の南中から次の南中までの（恒星日の）行数を計り（おそらくいくつかの恒星を計りその平均値）、それを太陽日に換算したということである。天文家高橋至時の弟子である伊能は恒星日と太陽日の違いを理解し、換算ができていたことがこの記事からわかる。ちなみに1平均恒星日は（1平均太陽日より3分56秒短い）約23時間56分である。

表 2 享和 2 年 2 月 16 日 (1802-Mar-19) 月食, 深川黒江町 (139:47:40E).

Table 2 Lunar eclipse (Mar. 19, 1802) observed at Kuroe Cho, Edo (Tokyo).

	垂球読み	相対行数	基準化 10000 分	地方時	時差補正	NASA		時差 (時)	経度差 (度)
						月食表	時換算		
午中	324353	0	0.00	12.0000					
復円	348557	24204	4057.19	21.7373	21.8706	21:31	21.5167	0.3539	5.3085
午中	384010	59657	10000.00	36.0000					

江戸深川黒江町 139.7943E 経度差 4.7943 度 時差 0.31962 時間.

午中時刻 12h:08m (均時差による推定).

表 2 に即して述べる。前日の午中 (南中) から翌日の午中までの 1 視太陽日における垂揺球儀 (垂球) の行数は 59657 である。これを 10000 分となるように基準化すると復円 (Partial Eclipse End) は午中から 9.7373 時間 (9 時間 44 分 14 秒) 経過後となる。この日の均時差 (推定値) は -08 m (0.1333 時間) であるので, 平均太陽時の 12.0 時から測れば, 9.8706 時間後 (地方時で 21.8706 時) に復円したことになる。一方 NASA の月食表では復円は 21 時 31 分 (JST 21.5167 時) であるので, 時差は 0.3539 時間である。これは経度差 5.3085 度に相当する。実際の経度差 (地理院地図による) は 4.7943 度である。ここでは均時差の推定と NASA の表の月食時刻のそれぞれに誤差がないとして, 伊能の観測値は黒江町 (139:47:40E, 139.7944E) より, 0.51 度ほど東の点に相当する。

IV. 小倉における文化 9 年 (1812 年)

7 月の月食観測

伊能は第八次測量行の 7 月 15 日から 18 日まで, 4 日間小倉城下 (船頭町, 33:53:12N, 130:52:46E) に滞在した。月食は 7 月 16 日 (グレゴリオ暦 1812-Aug-22) である。佐久間 (1998) 『日記』には「十六日, 朝より晴天, 夜も同じ。月食を測る。夜八ツ後に終る」とある。大谷 (1917, p. 422-426) は皆既であったこの月食についての記録を載録している。このデータは佐久間 (2006) にはない。

2 本の望遠鏡に「測食定分儀」(大谷, 1917,

p. 412-421) をとりつけ, それによって観測した異なる食分ごとに一測から七四測まで観測記録がある。多数回測定し, 平均をとって観測精度を上げようとしたのであろう。しかし江戸の暦局でも同じ観測をしていなければ意味はない。ただし欠測した値を前後の値から補間することには使える。例えば食甚 (中心) の時刻は前後の食分時刻から推定したものである。なお食分が十分のときの初虧・食既・食甚・生光・復円については『寛政暦書』巻 8 の冒頭部分に定義が述べられている。もちろん部分食では食既と生光はない。

ここでは NASA の月食表との対応を見るために, 初虧 (一測), 食既 (三十四測, ただし失測) 食甚 (三五測), 生光 (三十六測), 復円 (七十四測) だけを抜粋している (表 2)。NASA の月食表では, (1) Pen. Eclipse Begins, (2) Partial Eclipse Begins, (3) Total Eclipse Begins, (4) Mid. Eclipse, (5) Total Eclipse Ends, (6) Partial Eclipse Ends, (7) Pen. Eclipse Ends が示されている。ここで, Pen. とは Penumbral の略で裸眼では見えないと注記されている。伊能の記録との対応では, (2) が初虧, (3) が食既, (4) が食甚, (5) が生光, (6) が復円, である。各食分の alt (地高) の値が一致していることでもこの対応は確かめられる。

表 3 に即して述べる。午中から午中までの垂揺球儀の行数は 59797 であり, 表 2 の値とは異なる。同じ機器かどうかはわからない。1 太陽日の行数を基準化すれば, その差は消える。例えば, 初虧 (Partial Eclipse Begin) は午中から 9.8409

表 3 文化 9 年 7 月 16 日 (1812-Aug-22) 月食, 小倉船頭町 (130:52:46E).

Table 3 Lunar eclipse (Aug. 22, 1812) observed at Kokura, Kyushu.

	垂球読み	相対行数	基準化 10000 分	地方時	時差補正	NASA		時差 (時)	経度差 (度)
						月食表	時換算		
午中	417828	0	0.00	12.0000					
初虧	442347	24519	4100.37	21.8409	21.8909	22:13	22.2167	-0.3258	
食甚	446841	29013	4851.92	23.6446	23.6946	00:01	24.0170	-0.3224	
生光	448922	31094	5199.93	24.4798	24.5298	00:51	24.8500	-0.3202	
復円	451339	33511	5604.13	25.4499	25.4999	01:49	25.8167	-0.3168	
午中	477625	59797	10000.00	36.0000					
平均								-0.3213	-4.8195

船頭町 130.8794E 経度差 4.1206 度 時差 0.27471 時間.
太陽南中時刻 12h:03m (均時差による推定).

時間 (9 時間 48 分 32 秒) 経過後となる。この日の均時差 (推定値) は -03 m (-0.05 時間) であるので, 平均太陽時の 12.0 時から測れば, 9.8909 時間後 (地方時で 21.8909 時) に初虧したことになる。NASA の月食表では 22 h 13 m (22.2167, JST) としているので, 時差は -0.3258 時間である。他の食分についても同じように計算した。4 つの食分について時差の平均は -0.3213 時間, 経度差は 4.8195 度 (東経 130.1805 度) となった。伊能の観測値は小倉船頭町 (130:52:46E, 130.879E, 地理院地図) より, 0.70 度ほど西の点となる。

V. 下田と江戸における文化 12 年 (1815 年) 10 月の月食観測

文化 12 年 (1815 年) 第九次伊豆諸島測量の帰路, 11 月 10 日から 19 日まで, 10 日間伊能測量隊は下田に滞在し月食を観測している。伊能は高齢を理由に参加していない。月食は皆既で 16 日 (グレゴリオ暦 1815-Dec-16) にあった。『日記』には「十六日晴天。同所滞留。午中太陽測。夜星側。四時過より月食初亏。即全山皆既。九ツ半時過復円。それより星測, ハッ時過に至て止。異曲別記」とある。それに先立ち 13 日に星測 (多分緯度観測), 14 日に「子正後より暁七ツ時頃まで雲間測」とある。15 日に「午中太陽測。夜星測ハッ時過迄雲あり不成」とある。

表 4 江戸と下田間の基準化時刻による時差および経度差.

Table 4 Local time difference and longitude difference between Edo and Shimoda.

	暦局 (浅草)	下田	差
子正	0.00	0.00	
初虧	8517.10	8479.79	37.3100
食既	8966.38	8930.53	35.8500
生光	9630.82	9596.67	34.1500
子正	10000.00	10000.00	
復円	10069.58	10033.68	35.9000
		平均	35.8025

この月食は下田 (138.9444E) と江戸暦局 (139.8386E, 浅草司天台) の両方の観測データがそろっている (大谷, 1917, p. 427)。2 地点で同じ月食を観測しているのであるから, 地方時の差をとり, 均時差を相殺して, 2 地点間の時差を直接計算できる。表 4 に即して述べる。大谷は食分の 4 つの時点 (「初虧」「食既」「生光」「復円」) で地方時の差 (時間差) を求めている。4 つの値の平均値は 35.8025 分 (ぶ, ただし 10000 分が 1 日) である。これは 0.08593 時間 (5.1558 分) 相当である。時差 4 分が経度差 1 度であるから, 時差 5.1558 分は経度差 1.2890 度となる。この短報と大谷の値の違いは整数計算と小数 (点以下 2 桁) 計算の差によって生じた分だけである。

佐久間 (2006) は大谷 (1917) の該当箇所を

表 5 文化 12 年 11 月 16 日 (1815-Dec-16) 月食, 江戸暦局 (139:50:19E).

Table 5 Lunar eclipse (Dec. 16, 1815) observed at the governmental Astronomical Observatory, Edo.

	基準化時刻 10000 分	地方時	均時差補正	NASA		時差 (時)	経度差 (度)
				月食表	時換算		
子正	0.00	0.0000					
初虧	8517.10	20.4410	20.3577	20:06	20.1000	0.2577	
食既	8966.38	21.5193	21.4360	21:06	21.1000	0.3360	
生光	9630.82	23.1140	23.0307	22:44	22.7333	0.2974	
子正	10000.00	24.0000	23.9167				
復円	10069.58	24.1670	24.0837	23:44	23.7333	0.3504	
					平均	0.3103	4.6552

浅草暦局 139.8386E 経度差 4.8386 度 時差 0.32257 時間.

太陽南中時刻 11h:55m (均時差による推定).

表 6 文化 12 年 11 月 16 日 (1815-Dec-16) 月食, 下田 (138:56:40E).

Table 6 Lunar eclipse (Dec. 16, 1815) observed at Shimoda, Izu Peninsula.

	基準化時刻 10000 分	地方時	均時差補正	NASA		時差 (時)	経度差 (度)
				月食表	時換算		
子正	0.00						
初虧	8479.79	20.3515	20.2682	20:06	20.1000	0.1682	
食既	8930.53	21.4333	21.3500	21:06	21.1000	0.2500	
生光	9596.67	23.0320	22.9487	22:44	22.7333	0.2154	
子正	10000.00						
復円	10033.68	24.0808	23.9975	23:44	23.7333	0.2642	
					平均	0.2244	3.3663

下田 138.9444E 経度差 3.9444 度 時差 0.26296 時間.

太陽南中時刻 11h:55m (均時差による推定).

引用していないが, 同じデータ, 同じ計算である。大谷と佐久間が採録しているデータは同じもので, 伊能家 (現在は記念館) 所蔵のものである。

地理院地図では江戸暦局と下田の経度差は 0.8942 度であるから, 測量誤差は 0.3948 度になる。残されている資料で見る限り, 江戸と下田の観測は経度測定のための 2 地点同時観測が成功した唯一の事例である。この測量誤差は江戸と下田の測量のどちらにどれくらい起因しているか次に検討する。

大谷 (1917, p. 427) のデータは揺垂球儀の行数值ではなく, 1 太陽日を 10000 分に基準化した値で, しかも前夜の子中 (日付が変わる時刻) を起点としている。また前述しているように 1815-

Dec-16 の日の均時差による 135E における太陽南中の時刻 (JST) は 11 h 55 m である。

表 5・6 に即して述べる。地方時と均時差 (推定値) による補正時刻の計算は表 2・3 と同じである。表 3 と同じように食分の 4 つの時点で地方時を測定している。

表 5 に示しているが, 江戸暦局と 135 度線との時差の平均値は 0.3103 時間, この平均値に相当する経度差は 4.6552 度である。地理院地図による経度差は 4.8386 度であるから, 差は 0.1834 度 (11.00 分) で, この精度は良好であるといえる。

表 6 では下田と 135 度線との時差の平均値は 0.2244 時間, この平均値に相当する経度差は

3.3663 度である。地理院地図による経度差は 3.9444 度であるから、差は 0.5781 度 (34.6860 分) で、江戸暦局の値より 3 倍ほど大きな誤差となっている。2 地点間の測量誤差の大部分はこのように下田の測定値の誤差が大きいことによる。ただし、この事例では誤差の向きが逆なので、2 点間の経度差の値としては、相殺されている ($0.5781 - 0.1834 = 0.3947$ 度)。旅行中の下田での測定データが、暦局のそれより劣るのは当然かもしれない。あるいは観測に熟練した伊能の不在が原因であろうか。

表 5 と表 6 のデータは均時差 (これは両地点で同一の値としてよい) を推定して、135 度との経度差を計算している。初虧・食既・生光・復円など食分の認定とその時刻の測定は 2 地点間の距離の大小とはまったく無関係である。一方導線測量による東西位置は遠距離になるほど誤差が蓄積されていることに留意しなければならない。

月食を遠隔の 2 か所で観測し、地方時の差から経度差を得ようとした伊能の観測記録文書は現在のところ表 4 の 1 例しか存在が知られていない。しかもそれは江戸と下田という比較的近い距離についてであった。しかし NASA の月食表を利用し伊能の観測日における均時差を推定すると、伊能の月食観測の精度を評価できることをこの短報で示した。この方法によって『寛政暦書』巻 33 などに記述されている「古」観測記録などについても精度評価が可能となる。

経度で 0.5 度 (III 章)、0.7 度 (IV 章)、0.2 と 0.6 度 (差では 0.4 度) (V 章) などの測量誤差に対する評価は見解が分かれるであろうが、東西位置が導線測量だけでしか得られないとすれば、日本図の作成のためには十分価値がある経度差測定の精度であると考えられる。

謝 辞

日食観測と経度の測定について (II 章)、教示いただいた次の方々に謝意を表します。中村 士博士 (元東京天文台)、仙石 新博士 (元水路部)、国立天文台天文情報センターの方々 (2017 年 11 月 21 日付け文書による教示)。

文 献

- 青木信仰 (1982): 時と暦. 東京大学出版会. [Aoki, S. (1982): *Time and Calendar (Toki To Koyomi)*. University of Tokyo Press. (in Japanese)*]
- 嘉数次人 (2008): 江戸幕府の天文学 (その七). 天文教育, **20**(5), 16-21. [Kazu, T. (2008): Astronomy under Edo government. *Tenmon Kyouiku*, **20**(5), 16-21. (in Japanese)*]
- 国立天文台 (2018): 理科年表 2019 年版. 丸善出版. [National Astronomical Observatory of Japan (2018): *Chronological Scientific Tables*. Maruzen Publishing. (in Japanese)]
- 佐久間達夫解説校訂 (1998): 伊能忠敬測量日記. 大空社. [Sakuma, T. ed. (1998): *Survey Diary by Inoh Tadataka (Inoh Tadataka Sokuryo Nikki)*. Ozorasha. (in Japanese)*]
- 佐久間達夫 (2006): 伊能測量隊の経度の測定 (一). 伊能忠敬研究, **46**, 60-66. [Sakuma, T. (2006): Measurement of the longitudes by Inoh survey team (1). *Inoh Tadataka Journal: Studies of Inoh's Map and Writings*, **46**, 60-66. (in Japanese)]
- 大谷亮吉 (1917): 伊能忠敬. 岩波書店. [Otani, R. (1917): *Ino Tadataka*. Iwanami Shoten. (in Japanese)*]
- 小曾根 淳 (2011): 垂揺球儀 (天文観測用時計) の起源について. 京都大学数理解析研究所講究録, **1739**, 157-167. [Ozone, J. (2011): Origin of Suiy-ou Kyugi (pendulum clock for astronomical observations made in Japan). *RIMS Kokyuroku*, **1739**, 157-167. (in Japanese)*]
- 渋川景佑・山路諸孝・足立信頭・吉田秀茂編著 (1844): 寛政暦書 (天文方控え本, 天保 15 年). [Shibukawa, K., Yamaji, Y., Adachi, S. and Yoshida, H. eds. (1844): *Kansei Calendar (Kansei Rekisho)*. (in Japanese)*]
- 渡辺敏夫 (1994): (日本・朝鮮・中国) 日食・月食宝典. 雄山閣. [Watanabe, T. (1994): *Treasury of Solar and Lunar Eclipses (Nihon Chosen Chugoku Niss-hoku Gesshoku Hoten)*. Yuzankaku. (in Japanese)*]
- * Title etc. translated by M.N.