

月距法による時刻推定 –
間接測定による方法の実海域での検証 –

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-05-31 キーワード (Ja): キーワード (En): Lunar Distance Method, Celestial Navigation 作成者: 田中, 隆博, 小林, 拓司, 島村, 圭一, KOBAYASHI, Takuji, SHIMAMURA, Keiichi メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15053/0000000200

月距法による時刻推定 — 間接測定による方法の実海域での検証 —

田中 隆博¹ 小林 拓司² 島村 圭一²

Time Determination by Lunar Distance Method — Indirect Measuring of Lunar Distance and Verification on Actual Ocean Voyage —

Takahiro Tanaka¹, Takuji Kobayashi² and Keiichi Shimamura²

Abstract

There was no way to know the error of clock once the ship sailed out into the ocean before the invention of marine chronometer. The navigator asked for the answer into the movement of heavenly bodies. The moon travels about 0.55 degree per hour, roughly equivalent to its own apparent diameter, against the celestial coordinate. Consequently, the angle between the moon and other celestial bodies, the angles called “the Lunar Distance”, changes from moment to moment. It can determine the time by measuring the Lunar Distance and comparing the distance with forecasted values on the almanac. However, to measure the Lunar Distance by sextant on the ship is very difficult, good results have not been raised with the classical Lunar Distance method.

In this paper, in order to overcome the difficulty of measuring the Lunar Distance, we showed the method which is able to measure the Lunar Distance indirectly. We actually performed the indirect measuring method on the ocean voyage and show some results.

Keywords : Lunar Distance Method, Celestial Navigation

1 はじめに

正確な海上時計が誕生する前の時計は 1 日に 15 分以上も狂ったと言われている。無線通信もなかった時代に船がひとたび大洋に出ると時計の誤差を検定する手段は天体の運動、中でも天空を時々刻々移動する月の座標を計測し予報値と比較することで時刻の推定を試みる手法「月距法 (Lunar Distance Method)」に頼るほかはなかった。

月食などの現象を利用した月による経度測定の発想は非常に古く紀元前にまで遡るが、大航海時代に入ると月を利用した経度測定法が大洋航海上の必要性からにわかに脚光を浴びることになる。月の公転周期は約 27.3 日であり、天球上での毎時

移動角度は平均約 0.55° になり、これは月の視直径と同程度の大きさにもなる。したがって、仮に月の天球座標を $1'$ 程度の精度で計測できれば、そのときの時刻を 2 分の精度で知り得ることになる。

時刻誤差 2 分は経度誤差 $30'$ に相当し、GPS などにより測位技術が進歩した現代にあっては全く実用にならない精度のように思われる。しかし、1714 年英国政府による経度法に懸けられた賞金の条件は、英国から西インドに至る航海で経度差 $30'$ 以内の経度測定方法発案者に対して 20,000 ポンド (英国国王の身代金相当の金額)、 $40'$ 以内が 15,000 ポンド、 $60'$ (1°) 以内が 10,000 ポンドであったことはよく知られているように、時刻誤

Received November 15, 2012

¹ 海上保安大学校 海事工学講座 tanaka@jcg.ac.jp

² 海上保安大学校

我が国に西洋式の航海術が入り始めたのは19世紀の中ごろであるが、その頃にはクロノメータ（18世紀に入ってから海上時計をクロノメータと呼ぶようになった。）が普及しており、月距法は凋落していた。かの咸臨丸が太平洋を横断する際には複数のクロノメータが搭載されるとともに月距法も併用された²⁾と伝えられているが、月距法の技術が我が国で広く実用されることはなく、必然的に我が国の航海暦等に月距が示されることはなかった。月距を掲載した暦こそ英国では1907年（米国は1911年）まで作成されていた²⁾ものの、月距法に関する文献、とりわけ国内の文献は非常に少なく、飯田³⁾⁴⁾による月距法の原理や歴史の調査が貴重な資料となっている。また、滝川⁵⁾が我が国の天測暦を用いての月距の算出や月距法の具体的な計算プロセスを例示しているが、実際に月距法を実行

(1)

$$\cos Dt = \sin at^* \cdot \sin at^{\circ} + \cos at^* \cdot \cos at^{\circ} \cdot \cos Y \quad (2)$$

得られた真月距 Dt を、天体暦に予報されている各時刻（当時の天体暦では 3 時間毎⁴⁾）の月距と比較、数値補間の手続きを経て測定時の時刻が得られる。なお、1911 年を最後に月距が示された天体暦は発行されていないため、月距法を実際に行うためには自ら月距を算出する必要がある。

以上の手続きを経れば、容易に時刻の推定ができそうに思えるが、実際には計算機のなかった時代に高度測定をした後、球面三角形を解き種々の改正や補間の手続きをする労力は相当なものであったことは想像に難くない。実際、月距法を熟知した航海士でさえ時刻を得るまでの一連の手続きに 4 時間も要した²⁾と言われている。

月距法によって時刻を得るまでの計算に必要な労力はともかく、以上の手続きによれば、原理の上では経度の誤差 30' 以内に収めることも困難ではないが、月距法と対抗する時計との比較実験のための航海が数多く実施された結果、最終的に賞金総額約 20,000 ポンドを獲得したのは月距法の研究や開発に携わった者ではなく、一介の時計職人ジョン・ハリスンであった。ハリスンによる精密時計 H-4 の精度が認められて以降は、時計による経度測定が優勢となり月距法は急速に衰退して行くこととなる。時計が勝利した要因は、太陽の出没時刻などを読めば即座に基準場所との経度差が判明するという手軽さによるところが大きく、対する月距法が敗北した最大の理由は、計算に要した時間に加え複雑で煩雑な手続きをしたとしてもひとつの精度目標である経度誤差 30' ~ 1° 程度を安定的に実現できなかったことにある。

月距法が期待されたほどの成果を出すことができなかった理由は、理論的な問題というよりは次のような要因が大きかったと考えられる。

- ①観測者 3 名による同時観測による角度の測定、とりわけ視月距 Do の測定の困難さによる測定誤差の介入
- ②時刻を得るまでの手続きの煩雑さによる計算途中での誤差やミス介入
- ③当時の航海暦の予報精度

これらのうち、②は近代において種々の計算表の充実、また最近では計算機を利用することで解消されている。③については 1755 年のトビアス・マイヤーによる月距表で予報精度が実用の域に達

したと言われている²⁾³⁾⁴⁾ものの、それでも数分角程度の誤差が含まれていたようである。言及するまでもないが、時代を経る毎に精度は向上し現代の天体位置の予報精度は航海天文学に要求される精度を上回っている。①については、誤差を生じる最大の要因と考えられるが、図 1 に示した古典的な月距法を採るかぎり現代においてもなおも残る問題である。事実、平成 15 年練習船こじま遠洋航海中に月距の測定を試みた実習生から「天空を仰いでの視月距の測定は極めて困難であり、2 つの天体を六分儀の単眼鏡の視野に捉えることでさえ難しかった」との報告を受けている。

この①の問題については改良の余地があり、次章で説明する間接的に月距を計測する方法を考え、実際に時刻の推定を試みることにした。

3 間接測定による月距法

ここで説明する手法が成立するためには、前述の月距法（以下、古典的月距法と称する。）と同様に、天体暦、精度の高い測角器、計算表が存在していることが前提条件となり、加えて次の事項も満たされているものとする。

- ①およその時刻（数時間程度の誤差）は把握している。
- ②月距測定時の緯度 I は経度の誤差に対して十分な精度で把握できている。
- ③短時間であれば、ある程度の精度で時を刻むことができる（計ることができる）機器が手元にある。

これらの条件について、①は古典的月距法を実行する上でもおよその時刻を知っておく必要がある。②は緯度の計測には正確な「時」は不要であり経度と比べ容易に計測可能である。洋上での月距法の議論がなされていた当時でも高い精度で計測可能であったことは明白である。③は当時の精度の悪い時計や砂時計程度の機器で十分であるが、古典的月距法と同様に複数の観測者によって月の高度測定と天体の高度測定が同時に行える場合は不要である。

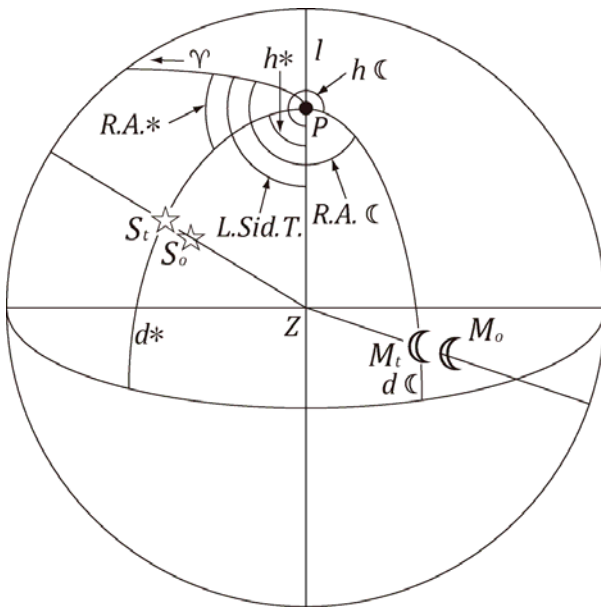
間接測定に必要な要素を図 2 に示す。同図に示した要素を用いて、次の i) ~ vi) のステップで時刻を推定する。

- i) ある時刻 To に月以外の天体（恒星など） So の高度 ao^* を測定し、 So の位置を高度改正により真位置 St に改め真高度 at^* を得る。

ii) 天体 St の赤緯 d^* は短期的には定数、緯度 l は既知なので、天文三角形 $PZSt$ から(3)式によって St の実測地方時角 h^* を得る。

$$\cos h^* = \frac{\sin at^* - \sin d \cdot \sin l}{\cos d \cdot \cos l} \quad (3)$$

iii) 月 Mo の視高度 ao を測定し、高度改正によって真位置に Mt に改め真高度 at を得る。観測者単独での測定であれば、天体 So と月 Mo との測定間の経過時間 Δt を測定しておく。厳密に言えば、 Δt は恒星時による経過時間のため平時と恒星時との差の修正をする必要があるが、測定間隔が 20 分程度までなら平時と恒星時の差は無視できる程度に小さいため、 Δt は平時による経過時間としてよい。間隔が 20 分を超える場合には平時と恒星時の差が無視できなくなり、その差は h の誤差、すなわち経度誤差そのものになるので修正を加える必要がある。複数観測者による同時観測であれば、 $\Delta t = 0$ である。



P : 天の極 h^* : St の地方時角 $R.A.*$: St の赤経
 d^* : St の赤緯 γ : 春分点 $L.Sid.T.$: 地方恒星時
 $R.A.$: Mt の赤経 d : Mt の赤緯

図 2 間接測定による月距法の説明図

iv) 恒星の赤経 $R.A.*$ も短期的に定数と考えてよいので、 Mo の高度測定をしたときの地方恒星時 $L.Sid.T.$ を(4)式によって得る。

$$L.Sid.T. = h^* + R.A.* + \Delta t \quad (4)$$

v) To のおよその時刻は把握できている前提なの

で、前後の適当な時刻における月の赤緯 d と赤経 $R.A.$ を天体暦から読み取り、月の各時刻における予想時角 h を(5)式によって算出する。

$$h = L.Sid.T. - R.A. \quad (5)$$

vi) 予想時角 h 、赤緯 d および緯度 l から、把握しているおよその時刻前後数時間分の月の予報高度 ap を算出し、数値補間によって $ap = at$ となる時刻が月の高度を測定した時刻 $To + \Delta t$ である。

ただし、我が国の天測暦には天体の赤経 $R.A.$ が記載されていないため、赤経 $R.A.$ は時角計算の簡単化のために示されている E という特殊な値から (6) 式によって逆算する必要がある。恒星の E_* は平均太陽の赤経 $R.A.M.S.$ と時間変化量が等しいため、観測日の $UT = 0^h$ の値を計算すればよい。なお、精密な天体暦とも言える海上保安庁海洋情報部編集の天体位置表は平成 22 年版をもって廃刊となっている。

$$R.A. (* \text{ or } \epsilon) = R.A.M.S. - E_* (\text{or } E_\epsilon) - 12^h$$

ここで、 $R.A.M.S. = Ro + p.p. + 12^h$

Ro : 天測暦に示されている値

$UT = 0^h$ における $R.A.M.S. + 12^h$

$p.p.$: E_* の比例部分

(6)

以上の手法は、図 1 と図 2 とを比較して分かるように、古典的月距法が地平座標の概念を基本としており、航海士は天体暦に予報された月距との比較という単純な手続きで時刻の推定ができるのと比べると計算手順がやや複雑である。加えて、地平座標のほかに赤道座標の概念や天体の運行に関する相当の知識を必要とする。一方で、この手法は古典的月距法での測定困難な視月距 Do を直接測ることに代え、天頂 Z を経由しての天体と月との角距離を測定していることになり、観測者は高度の圏上での測定（水平線と天体との間の角度の測定）を 2 回行えばよく、熟練航海士でなくても比較的精度良く計測が可能である。また、 Δt を計測しておけば観測者 1 人でも実行できる点は大きなメリットである。

この手法は、前章で挙げた残された問題点を解消できるとともに、測定者の技能レベルの影響が少なく、月距を精密に直接測定できるまでの技術を有しない者にも行える測定手法である。

表1 測定値および時刻推定結果

測定値および時角等計算結果												
番 号	観測日時(UT)		船位(GPS)	恒星名	恒 星			月			時刻推定	
	日 付	時-分-秒	緯度／経度		測定高度 [※] (<i>a_o</i> ,*)／真高度 ^{※※} (<i>a_r</i> ,*)	地方時角(<i>L.H.A.</i>)	地方恒星時(<i>L.Sid.T.</i>)	測定高度 [※] (<i>a_o</i> ,*)／真高度 ^{※※} (<i>a_r</i> ,*)	月 齢	毎時月距変化量	時刻(UT)	月の予報真高度(<i>a_p</i> ,℃)
①	2012/5/31	01 -55- 00	13° 02.2' N	18 Arcturus	52° 02.9'	320° 47.5'	174° 51.3'	66° 11.0' (上辺)	10.1	0.09°	01 -00- 00	66° 45.7'
			103° 05.5' W		51° 55.1'	66° 11.5'		02 -00- 00			66° 18.1'	
								02 -14- 29			66° 11.5'	
								03 -00- 00			65° 50.7'	
②		21 -48- 00	36° 00.0' N	13 Vega	37° 57.5'	292° 48.2'	212° 09.2'	34° 11.2' (下辺)	6.3	0.12°	21 -00- 00	35° 00.5'
			029° 12.1' W		37° 49.6'			21 -28- 46			35° 06.7'	
								22 -00- 00			35° 13.5'	
								23 -00- 00			35° 25.8'	
③	2012/6/25	21 -53- 24	36° 00.0' N	33 Antares	19° 54.6'	325° 55.4'	213° 28.6'	33° 15.9' (下辺)	6.3	0.40°	20 -00- 00	35° 51.8'
			029° 10.2' W		19° 45.3'			21 -00- 00			34° 05.0'	
								21 -31- 49			34° 11.9'	
								22 -00- 00			34° 18.3'	
④		22 -01- 17	36° 00.0' N	1 Polaris	35° 26.5'	算出できず	算出できず	31° 54.4' (下辺)	6.3	-	-	
			029° 07.4' W		35° 18.5'	32° 50.8'						
⑤	2012/6/26	21 -19- 54	36° 00.0' N	18 Arcturus	74° 14.3'	算出できず	算出できず	36° 55.4' (下辺)	7.3	-	-	
			020° 47.2' W		74° 07.4'	37° 50.7'						
⑥		19 -32- 12	37° 45.9' N	13 Vega	43° 11.9'	299° 03.2'	218° 24.2'	29° 10.2' (上辺)	11.2	0.29°	19 -00- 00	29° 40.0'
			006° 09.4' E		43° 04.4'			19 -06- 11			29° 38.4'	
								20 -00- 00			29° 25.1'	
								21 -00- 00			29° 10.1'	
⑦	2012/6/30	19 -34- 43	37° 45.9' N	13 Vega	43° 39.9'	299° 41.2'	219° 02.2'	29° 14.4' (上辺)	11.2	0.29°	19 -00- 00	29° 49.4'
			006° 10.0' E		43° 32.4'			19 -28- 12			29° 42.6'	
								20 -00- 00			29° 34.8'	
								21 -00- 00			29° 20.2'	
⑧		19 -37- 51	37° 46.0' N		44° 19.3'	299° 41.1'	219° 02.1'	29° 21.7' (上辺)	11.2	0.29°	18 -00- 00	30° 03.6'
			006° 10.9' E		44° 11.9'			18 -58- 00			29° 49.8'	
								19 -00- 00			29° 49.3'	
								20 -00- 00			29° 34.8'	
								20 -00- 00			29° 34.8'	

※器差改正後の高度
※※眼高14m

4 間接測定による月距法の実海域での検証

前章で説明した間接測定による月距法を、平成24年度練習船こじま遠洋航海実習中に実海域で実行し、時刻の推定を試みた。高度測定は実習生2名によって行い、測定は天測実習等で六分儀の取り扱いに関して一定の経験を積んだ段階で実施している。なお、月距法の原理に基づいて所要の精度の時刻を求めるためには、恒星の選定やその測定時期、薄明時間、月齢などの条件を吟味する必要があるものの、実習で定時実施しているイブニングサイトに併せての測定では測定機会が限られているため今回はそれらについては考慮せず、天空を見上げて測定可能であった恒星を測定している。

測定は4日（計8回）行い、表1が観測値等を取りまとめたものである。船上で実施した時刻推定までの手続きを要約すると、次のi)～iv)となる。

i) 高度測定は2名で同時に行い（したがって、今回の測定では $\Delta t=0$ ）、あわせて推定時刻の精度等を検証するために時刻(UT)および船位(GPS)を記録しておく。緯度測定の手続きを省くためと緯度の誤差の影響を排除するためにGPSによって得られた緯度 l を実測緯度とする。

ii) 測定高度を真高度に改正し、(3)および(4)式によって実測の地方時角 h^* および地方恒星時 $L.Sid.T$ を算出する。

iii) (5)式から1時間毎の月の予想時角 h_C を計算し、月の予報高度を算出する（表1の予報高度は時刻推定付近の3時間分のみ掲載）。

iv) 月の予報高度を数値補間し、予報高度 ap_C と実測高度 at_C とが等しくなる時刻を求め、測定時刻を推定する（表1の「時刻推定」欄の「月の予報真高度」と「時刻(UT)」の網掛けセルが、数値補間した高度と推定した時刻）。

なお、表1の測定④および⑤は特殊な状況の天体を測定したことによって地方時角等が算出できない。これらが算出できない理由は、測定④に用いたPolaris（北極星）は天の極に極めて近い天体（赤緯 $d=+89.3^\circ$ ）であるため、時角の変動に対する高度変化が極めて小さく、高度観測によって実測時角を求める観点からは適切な天体ではなかった。GPSの船位とUTの記録から推算すると、測定④については高度を低く（ $0.3'$ 以上）測っていたことによって地方時角の解が定まらなかった。また、測定⑤については、Arcturusが極めて正中に近い状態（ $h^*=00^h 02^m$ ）にあり、高度変化が生

じない時期であったため、観測に適した状況ではなかった。測定⑤は、測定④とは逆に高度を高く（ $3'$ 以上）測っていたことによって解が定まらなかった。

測定④⑤については月距法で時刻推定する上では適切な測定ではなかったが、これらの結果は六分儀による高度測定値に相当の誤差が介入していたことを示唆する記録でもあるため掲載している。

表2に各測定によって得られた推定時刻と正しい時刻との差（時刻誤差）および時刻誤差を経度誤差に換算した結果を示す。測定①を除き「+」の誤差（慣習から推定時刻が正しい時刻から遅れている状況を「+」と表現する。）となった。測定①は初回の測定であり計測等の要領に慣れていなかったことを勘案し軽視するとして、残りの5回の誤差を単純平均すると+22分36秒（経度誤差 $+5^\circ 39.1'$ ）にもなり、最も誤差が小さかった測定⑦でも+6分31秒（経度誤差 $+1^\circ 37.8'$ ）もの誤差があった。このように、期待したほど時刻推定精度が高くなかった理由として次のような原因が考えられる。

表2 時刻誤差（経度誤差）

	時刻誤差	経度誤差換算
①	－ 19 分 29 秒	－ $4^\circ 52.3'$
②	＋ 19 分 14 秒	＋ $4^\circ 48.5'$
③	＋ 21 分 25 秒	＋ $5^\circ 21.3'$
⑥	＋ 26 分 01 秒	＋ $6^\circ 30.3'$
⑦	＋ 06 分 31 秒	＋ $1^\circ 37.8'$
⑧	＋ 39 分 51 秒	＋ $9^\circ 57.8'$

まず、月距法の原理は月の視直径にも及ぶ月距変化量があることを前提としている。しかし、表1に「毎時月距変化量」として示しているように、白道付近に存在し月と一定の角距離がある天体でなければ、月の視直径にも及ぶ変化量とはならない。比較的月距の変化量が大きかった測定③でも月の平均毎時移動角度に対し70%程度、測定⑥～⑧については平均毎時移動角度の50%程度、測定②にいたってはわずか20%強の月距変化量にしかならず、この減少分はそのまま推定時刻の精度を低下させてしまう。

また、(3)式に示した実測の地方時角の精度は、高度測定の誤差に天体の方位角の正弦と緯度の正弦が反比例して劣化するため、できる限り東西圏に近い時期に測定しなければならない。比較的その条件に近かった測定は⑥～⑧であり、その他の測定については条件が良くなかった。

さらに、古典的月距法の弱点として 3 名の観測者の測定によって複雑な誤差が介入することが指摘⁶⁾されているが、測定④⑤から予想されるとおり、今回の高度測定値にも種々の誤差が含まれており、高度測定の誤差だけでも 3' 以上になっていた可能性がある。恒星と月双方ともこのオーダーで高度測定に誤差が介入しただけでも、方位角や緯度の条件によっては 10 分以上の時刻誤差を生じる可能性がある。今回提案した間接測定の手法であっても、古典的月距法同様に六分儀の扱いについては相当高い技量が要求されることになる。

5 おわりに

古典的月距法の視月距を直接測定することの困難さを回避するために、間接的に測定する手法を提案し、遠洋航海中に実際に測定を試みた。測定回数は多くなかったものの、この測定方法によれば、測定技術の錬度が低い実習生によっても測定自体は実行可能であることが確認できた。ただし、得られた推定時刻誤差の平均は 20 分（経度誤差 5°）を超えていた。

今回の結果は経度法の賞金 10,000 ポンドにも及ばない精度ではあったものの、月距法が実用された時代の末期の 1802 年に英軍艦スペンサー号ほか 3 隻によって行われた月距法による船位精度（測定経度のばらつき）の検証^{3) 4) 6)}では 8° を超える経度差（幅）があったことと比べれば、今回の結果の方がやや良いように思われる。間接測定による方法は次の点に留意して観測すれば、時刻精度にはまだ改善の余地があり、熟練者であれば当初予想した経度差 1° 内外での経度測定を達成できるものと考ええる。

- ・六分儀の取り扱いについては錬度を十分高めておき、器の調整および検定は定期的実施する。
- ・高度測定は単独で実施する。
- ・ある程度月距変化量のある天体を選定し、天体の高度変化が大きい時期に測定する。

謝辞

遠洋航海中に古典的月距法の再現実験を試みた海上保安大学校本科 49 期生の木原寛治氏、また、ここで提示した間接測定による月距法の洋上での実行可能性についての検証に協力いただいた本科 57 期生の梅田一盛氏および渡邊翔太氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 飯島幸人, 「航海技術の歴史物語 帆船から人工衛星まで」, 成山堂書店, 2002, 140-143.
- 2) Dava Sobel (藤井留美訳), 「経度への挑戦 一秒にかけた四百年」, 翔泳社, 1997.
- 3) 飯田嘉郎, 月距法（太陰距離法）, 日本航海学会「航海」, No.22(1965), 13-22.
- 4) 飯田嘉郎, 「航海術史」, 出光書店, 1984, 145-160.
- 5) 滝川文雄, 古典月距法, 日本航海学会「航海」, No.24(1966), 4-8.
- 6) J.B. Hewson (杉崎昭生訳), 「交易と冒険を支えた航海術の歴史」, 海文堂出版, 2007, 260-268.