

1等星食のビデオ観測キャンペーンから 求めた精密月縁データ

相馬 充, 早水 勉[†]

(2000年10月16日受理)

Lunar Limb Profile Data Obtained from a Video Observation Campaign of Lunar Occultations

Mitsuru SÔMA, Tsutomu HAYAMIZU[†]

Abstract

Lunar occultations of the 1st magnitude stars Aldebaran and Regulus occurred in 1998 and 1999. In order to obtain precise limb data we had a campaign of the observations of them throughout Japan. This paper presents the results of the campaign.

1. はじめに

月が恒星を隠す星食は、かつては月の運動や地球の自転速度変動、離島の位置決定などの研究に用いられてきたが、現在ではそれらは、レーザー測距、VLBI、原子時計、GPSなどの技術によって、より精密に求めることができるようになった。代わって、現在における星食観測の意義としては、主として次の2点が上げられる¹⁾。

1. 精密な月縁データを得る。月面地形の調査は1994年にアメリカのクレメンタイン月面測量計画によって行われた²⁾が、クレメンタインのレーザー高度計によって得られたデータは月面経度でおよそ3°毎の地域についてであり、それから月縁を知ることは不可能である。また、クレメンタインで得られた高度データの精度は最も良い場所で約50 mしかない。月の極地域の地形については、クレメンタインのステレオイメージ³⁾と地上からのレーダー干渉計⁴⁾によって求めることが試みられているが両者の一致は必ずしも良くない。現在、星食の解析に用いられている月縁データは、地上の写真観測から求めて1963年に発表されたWattsの月縁図⁵⁾であるが、秤動や位置角による系統誤差があることが知られており⁶⁻⁸⁾、場合によっては1"を越える誤差があることも報告されている⁹⁾。極地域の月縁地形

については接食観測の解析から、いろいろな秤動に対するデータが蓄積されつつある¹⁰⁾。月縁データは日食観測の解析から太陽直径の変化を求める際に特に重要な役割を果たす¹¹⁾。近年、地球大気中の二酸化炭素の増加(温室効果)による地球温暖化が問題になっているが、実際の地球の温度変化のうち、温室効果によるものがどの程度か、また太陽からのエネルギーの変化はどのくらいあるのか、などについては明らかになっていない。数十年の時間スケールでは、太陽から放射されるエネルギーは太陽の直径に比例することが示されている¹²⁾。したがって、日食観測から太陽直径の変化を精密に決定することは、地球温暖化の原因を明らかにするのにも重要である。

2. ヒッパルコス星表¹³⁾の固有運動システムの誤差を検出する。ヒッパルコス星表は1997年に発表され、可視光域の天体の位置の基準として、従来の基本星表に代わって用いられている。ヒッパルコス星表の与える座標系の精度は、座標軸の向きが0.6 mas (milliarcsecond) 以内、回転は0.25 mas/year 以内で国際天球座標系 ICRS に結び付いているといわれる。ところで、これまでの基本星表 FK5 は採用している歳差定数が約-3 mas/yearの誤差を持っていることが明らかになっている。この誤差はVLBI¹⁴⁾、月レーザー測距¹⁵⁾、固有運動解析¹⁶⁾という3種の独立な方法によって確かめられている。これらのことが事実であるとする、ヒッパルコス星表とFK5星

[†] せんだい宇宙館 (Sendai Space Hall)

表を直接比較したとき、FK5の歳差定数の誤差に当たる -3 mas/year に相当する系統差が検出されなければならない。しかし、実際に求められたヒッパルコスとFK5の系統差¹⁷⁾はこの予想をかなり下回るものであった。この事実は、ヒッパルコスの固有運動システムに予想を越える誤差が存在する可能性を示唆している。幸い、月の位置は精密なレーザー測距により、アメリカ JPL の最新の月惑星暦 DE405¹⁸⁾ において、ICRSに対して 1 mas の精度を有しているため、ヒッパルコスの固有運動システムの問題は、月の位置をヒッパルコスの座標系に対して求めることで解決できるはずであり、そのためには星食観測が最適の手段である¹⁹⁾。

1998年から1999年にかけて、1等星のアルデバランとレグルスの星食が起こった。そこで、我々は精密な月縁データを得ることを主な目的として、1998年10月9日のアルデバラン食、1999年1月5日のレグルス食、同年2月23日のアルデバラン食のビデオ観測を、全国のアマチュア天文観測家や一般の人々に呼び掛けた。この論文ではその結果について報告する。

以上の他にも、1999年6月18日のレグルス食と8月6日のアルデバラン食の観測も呼び掛けたが、これらは悪天候のため、観測できなかった。

2. 1等星食のビデオ観測キャンペーン

1等星という明るい恒星の星食は一般家庭用のビデオカメラで容易に撮影することができる。現象時に正確な時刻信号を同時に記録すれば、 $1/30$ 秒の精度で星食の時刻が測れることになる。これは月縁のデータを $0''.02$ 、月面上の実距離で 30 m 以内の精度で求められることを意味する。この精度は1994年のクレメンティン月面測量計画による高度測定精度を凌駕するものである。

精密な時刻を求める方法として、次の2種類のうちから観測者に都合の良い方を選んでいただいた。

1. 現象前後にNHK衛星第1テレビ(BS1)の画面をそれぞれ約1分間録画する。BS1の画面と正確な時刻との対応は、国立天文台の子午環観測用原子時計による時刻表示をBS1の画面と同時に録画することにより行った。地上波のテレビでなく衛星テレビを使用したのは、日本全国でのミリ秒以内の同時性が確実なためである。
2. 現象の録画と同時にJJYなどの短波標準電波を録音する。録音された時報とビデオのフレームとの対応は鹿児島県川内市せんだい宇宙館の業務用視聴覚設備ソニー製ノンリニアシステムES-7を使用し、音声と画像を同時に低速再生して行った。現象時刻測定に際しては、JJY(日

本)とHLA(韓国)はビデオ観測の精度では観測地までの電波伝播時間を無視できるので時報から求められた時刻をそのまま採用したが、BPM(中国)は 10 ms の進み(BPMのUTCの信号は 20 ms 進んでいるため、伝播時間の 10 ms を差し引き、 10 ms の進みになる。BPMでは毎時25分~29分と55分~59分はUT1を通報しているが、BPMを使用したこの時間帯の観測はなかった)、WWVH(アメリカ・ハワイ)は 20 ms の遅れ、WWV(アメリカ・コロラド)は 33 ms の遅れとした。

観測の呼び掛けは主として掩蔽観測者のメーリングリスト JOIN (Japanese Occultation Information Network)、公開天文施設のメーリングリスト、および、ニフティサーブのスペースフォーラム掩蔽会議室を通じて行われた。また共同通信社科学部の協力により多くの地方紙にも観測を呼び掛ける記事が掲載された。

現象のビデオ撮影に際しては、ビデオによる $1/30$ 秒の現象の時刻測定精度を確保するため、次の点にご注意いただいた。

1. 手ぶれ防止はオフにする。これはオンにした場合、画像信号が音声信号より遅れて記録される可能性があるからである。
2. 業務用カメラには蓄積モードを備えているものがある。その場合はシャッタースピードを $1/30$ 秒以下にし、マニュアルで撮影する。
3. ビデオの焦点もマニュアルにより合わせる方が安全である。
4. 5 MHz や 10 MHz ではJJY報時信号以外に外国の報時信号が受信できることがある。 8 MHz を利用すれば外国の信号の混信は避けられる。ただし、外国の報時信号を利用しても、電波伝播時間を補正することで、JJYとほぼ同じ精度で現象時刻が測定できるので問題はない。
5. JJY報時信号が受信できない場合は、NTTによる電話の117番時報サービスを利用することが可能である。NTTの時報は以前は誤差がときに 0.1 秒を越えることもあった²⁰⁾が、1987年9月に短波JJYに自動的に合わせる装置に変更してからは、かなり正確になった。回線遅延はあるが、我々の測定では年間を通して 0.03 秒以内の誤差である。なお、携帯電話(PHSを含む)は 0.2 秒前後の遅れがあるので使用できない。
6. 報時信号の停止時にあたるなどで現象時に報時信号が録音できない場合は、現象の前と後の両方にテープを回しっぱなしにして報時信号を録音することが望ましい。これは、ビデオのレートが規定では 29.97 Fr/sec なのに対して実際のレ

ートが異なる場合があるため、前後の報時信号から内挿により現象時刻を求める必要があるためである。

7. 電波時計は時報を受信して自動修正した直後でも 0.2秒程度の遅れがあるのが一般的で、その遅れの量も機種により異なり、時間によっても変化するので、使用できない。
8. ビデオカメラの内蔵時計表示は誤差が頻繁に変化するものがある。特に再生の際に表示するのはその傾向が強い。そのため、内蔵時計をいくら正確に合わせても(または、いくら誤差を正確に求めても)、それを用いて現象時刻を求めるのは危険である。
9. テレビの画面角に朝や昼過ぎなどに表示されるデジタルの時計は 0.1秒程度の誤差があることが多いので、正確な時刻としては使用できない。
10. 衛星放送を録画する場合は放送衛星からの電波を直接受信したものを使用する。ケーブルテレビでは遅れがありえるので使用できない。
11. 観測地点は 10m以内の精度で求める必要がある。できるだけ国土地理院の2万5千分の1地形図(都市部については1万分の1地形図)あるいは2千5百分の1の都市計画図から経緯度・標高を測定して報告いただくか、地形図上に観測地を記してお送りいただく。1万分の1地形図や2千5百分の1都市計画図では経緯度より平面直角座標の方が測定しやすい場合があるが、その場合は経緯度の代わりに平面直角座標で報告できる。GPSの測定では 100 m を越える誤差があることも珍しくないので、必ず地形図を使用する。国土地理院の地形図は書店で、都市計画図は市町村役場で入手できる。(2000年 5 月 2 日 13時 JST より、GPS の位置測定結果を意図的に劣化させる SA [Selective Availability] が解除され、以後は水平位置の測定精度がほぼ 10m 以内になっていることが確認できているが、観測キャンペーンのときは SA が解除されていなかった)

現象時刻をビデオにより求める場合、音声信号と画像信号の録画および再生時における同時性が問題になる。そこでそれをいくつかのカメラとビデオデッキを用いてテストした。

■テスト手順：

ビデオカメラで GHS 時計²⁰⁾の秒 LED を撮影。同時に、GHS 時計の音声信号を録音。撮影したビデオテープを宇宙館の視聴覚設備で同時性を検証。カメラ、ビデオデッキを変えて 6 通りテストした。

■テスト結果：

音声の正秒を基準として、映像の正秒の遅れを測定。

1 件のテストについて12回の測定を行い、遅れが一定でない場合はさらに12回の測定をし、Result の欄に遅れの頻度をパーセントで示した。

No.	Camera	Recorder	Media	Measured by	Result
1.	Vixen B05-3M	三洋SVH-F81	VHS	SONY SVO-5800	50% 0.5Fr 50% 0.0Fr
2.	Vixen B05-3M	SONY SVT-S5100	VHS	SONY SVO-5800	0.5Fr
3.	Vixen B05-3M	SONY DSR-30	DVCAM	SONY DSR-80	0 Fr
4.	日立 HV-C12	SONY SVT-S5100	VHS	SONY SVO-5800	1.0Fr
5.	日立 HV-C12	SONY DSR-30	DVCAM	SONY DSR-80	50% 0 Fr 50% 1 Fr
6.	SHARP Viewcam VL-HL3		Hi-8 [†]	SONY SVO-5800	75% 0.5Fr 25% 0.0Fr

[†]Hi-8 を民生デッキ(日立 VT-BS7)で VHS にダビングして測定

Notes.

- Vixen B05-3M : 1/60sec露出固定。
 日立 HV-C12 : 蓄積モードを装備する高機能機。
 テストでは、1/100sec露出で撮影。
- 三洋SVH-F81 : 民生VHSデッキ。標準速で録画。
 SONY SVT-S5100 : 業務用タイムラプスビデオ(VHS)。標準速で録画。
 SONY DSR-30 : 業務用DVCAMレコーダ。
 SHARP Viewcam VL-HL3 :
 民生ハンディー8mm(Hi-8)ビデオカメラ。
 カメラビデオ一体型。
 日立 VT-BS7 : 民生VHSデッキ。Hi-8 からのダビングに使用。
- SONY SVO-5800 : VHS対応の業務用編集機。
 分解能 1 Field(=0.5 Frame)。
 SONY DSR-80 : DV、DVCAM 対応の業務用編集機。
 分解能 1 Frame。

このテスト結果から、音声と画像のずれは 1 フレーム以内であることがわかった。

3. 観測結果

観測地のデータを表 1 に示す。経緯度は日本測地系による。

観測された現象時刻は表 2 のとおりである。表中、Acc は測定時刻の精度、Signal は時刻測定に用いた報時信号を示す。また、現象 (Phen) 欄の記号の意味は次のとおりである。

DD: 暗縁潜入

DB: 明縁潜入

RD: 暗縁出現

RB: 明縁出現

表1 観測地のデータ (日本測地系)

1998年10月9日 アルデバラン (ZC 692)					
経度	緯度	標高	観測者氏名		地図縮尺
° / ' / "	° / ' / "	m			
141 20 12.33	43 04 35.51	29	松永哲也	Tetsuya Matsunaga	1/1万
140 54 24.20	36 57 36.65	8	長瀬 稔	Minoru Nagase	1/2.5万
140 54 15.78	37 53 01.45	20	白石義高	Yoshitomi Shiraishi	1/2.5万
140 16 31.9	38 06 53.7	212	舟越利安	Toshiyasu Funakoshi	1/2.5万
139 44 47.4	35 44 02.8	31	笹沼範夫	Norio Sasanuma	1/2500
139 44 16.31	35 42 11.84	10	川西洋司	Yoji Kawanishi	1/1万
139 32 18.57	35 40 17.81	58	相馬 充	Mitsuru Sōma	1/1万
139 32 16.1	35 22 32.4	30	鈴木 智	Satoshi Suzuki	1/2.5万
139 06 07.57	35 07 11.13	108	松崎良作	Ryosaku Matsuzaki	1/2.5万
138 26 44.	35 53 15.	1078	石井 馨	Kaoru Ishii	1/2.5万
137 06 16.2	36 39 10.9	132	布村克志	Katsushi Nunomura	1/2.5万
136 12 34.9	35 05 54.	140	井田三良	Miyoshi Ida	1/2.5万
136 04 31.0	34 35 24.8	206	清水義喜	Yoshiki Shimizu	1/2.5万
135 16 00.7	35 18 29.3	80	山本道成	Michinari Yamamoto	1/2.5万
133 56 17.4	34 31 54.3	15	佐藤秀則	Hidenori Sato	1/2.5万
130 20 31.51	31 49 13.97	248	早水 勉	Tsutomu Hayamizu	1/2500

1999年1月5日 レグルス (ZC 1487)					
経度	緯度	標高	観測者氏名		地図縮尺
° / ' / "	° / ' / "	m			
140 06 16.	35 06 23.	9	浦辺 守	Mamoru Urabe	1/2.5万
139 44 16.31	35 42 11.84	10	川西洋司	Yoji Kawanishi	1/1万
138 13 18.7	36 20 53.3	493	松井 聡	Akira Matsui	1/2.5万
137 56 55.73	36 19 45.05	901	宮下和久	Kazuhisa Miyashita	1/2500
136 58 29.08	35 07 08.13	16	松浦典文	Noribumi Matsuura	1/1万
136 12 34.9	35 05 54.	140	井田三良	Miyoshi Ida	1/2.5万
136 04 31.0	34 35 24.8	206	清水義喜	Yoshiki Shimizu	1/2.5万
136 01 29.51	35 03 34.15	100	工藤法明	Noriaki Kudo	1/2.5万
131 23 39.	31 50 54.	18	前田幸治	Kouji Maeda	1/2.5万
130 20 31.51	31 49 13.97	248	早水 勉	Tsutomu Hayamizu	1/2500

1999年2月23日 アルデバラン (ZC 692)					
経度	緯度	標高	観測者氏名		地図縮尺
° / ' / "	° / ' / "	m			
143 46 12.0	43 27 13.6	380	津田浩之	Hiroyuki Tsuda	1/2.5万
142 28 16.65	44 21 35.54	104	佐野康男	Yasuo Sano	1/2.5万
142 24 54.4	43 49 34.1	135	笹野一規	Kazunori Sasano	1/2.5万
141 28 36.6	38 19 58.9	5	殿村泰弘	Yasuhiro Tonomura	1/2.5万
140 20 45.2	38 13 21.9	170	大場与志男	Yoshio Oba	1/2.5万
140 06 16.	35 06 23.	9	浦辺 守	Mamoru Urabe	1/2.5万
139 55 23.3	36 34 19.2	140	三宅 明	Akira Miyake	1/1万
139 44 47.40	35 44 02.80	31	笹沼範夫	Norio Sasanuma	1/2500
139 44 16.31	35 42 11.84	10	川西洋司	Yoji Kawanishi	1/1万
139 37 54.48	35 42 09.65	49	深津繁人・悦朗	S. & E. Fukatsu	1/1万
139 37 33.04	35 38 30.59	53	濱田毅一	Kiichi Hamada	1/1万
139 32 38.89	35 39 11.88	70	柳沢正久	Masahisa Yanagisawa	1/1万
139 32 25.85	35 40 17.95	58	相馬 充	Mitsuru Sōma	1/1万
139 29 13.2	35 42 58.0	78	鈴木保治	Yasuharu Suzuki	1/2.5万
139 28 45.3	35 40 42.9	60	佐藤幹哉	Mikiya Sato	1/2.5万
139 26 35.6	35 42 14.4	90	大金要次郎	Yojiro Ogane	1/2.5万
139 19 33.6	35 20 54.0	12	真田正弘	Masahiro Sanada	1/2.5万
139 19 02.13	35 38 52.79	167	中村 透	Toru Nakamura	1/1万
139 06 07.57	35 07 11.13	108	松崎良作	Ryosaku Matsuzaki	1/2.5万
138 26 44.	35 53 15.	1078	石井 馨	Kaoru Ishii	1/2.5万
137 56 55.73	36 19 45.05	901	宮下和久	Kazuhisa Miyashita	1/2500
137 06 16.2	36 39 10.9	130	渡辺 誠	Makoto Watanabe	1/2.5万
136 04 31.0	34 35 25.1	205	清水義喜	Yoshiki Shimizu	1/2.5万
135 16 00.7	35 18 29.3	80	山本道成	Michinari Yamamoto	1/2.5万
135 15 09.4	35 17 52.3	42	大槻直樹	Naoki Ootsuki	1/2.5万
134 20 19.	35 01 21.	446	時政典孝	Noritaka Tokimasa	1/2.5万

表2 現象時刻測定結果

1998年10月9日 アルデバラン (ZC 692)				
UTC	Acc	Signal	Phen	Observer
h m s	s			
14 07 34.76	0.10	BPM	DB	Tsutomu Hayamizu
14 14 49.40	0.03	JJY	DB	Yoshiki Shimizu
14 15 58.07	0.03	JJY	DB	Miyoshi Ida
14 16 07.57	0.05	NTT	DB	Michinari Yamamoto
14 17 59.10	0.03	JJY	DB	Satoshi Suzuki
14 18 32.48	0.03	JJY	DB	Kaoru Ishii
14 18 35.37	0.03	TV	DB	Mitsuru Sôma
14 18 49.97	0.05	NTT	DB	Norio Sasanuma
14 19 44.18	0.03	GPS	DB	Katsushi Nunomura
14 24 21.51	0.05	†	DB	Toshiyasu Funakoshi
14 37 27.40	0.07	WWVH	DB	Tetsuya Matsunaga
15 05 49.86	0.03	BPM	RD	Tsutomu Hayamizu
15 12 27.36 ‡	0.03	BPM	RD	Hidenori Sato
15 15 32.81	0.03	BPM	RD	Yoshiki Shimizu
15 16 05.90	0.03	JJY	RD	Miyoshi Ida
15 18 24.86	0.03	GPS	RD	Katsushi Nunomura
15 19 59.35	0.03	JJY	RD	Kaoru Ishii
15 20 27.13	0.05	NTT	RD	Ryosaku Matsuzaki
15 21 19.60	0.03	JJY	RD	Satoshi Suzuki
15 21 51.40	0.03	TV	RD	Yoji Kawanishi
15 21 53.40	0.05	NTT	RD	Norio Sasanuma
15 24 13.92	0.05	†	RD	Toshiyasu Funakoshi
15 24 36.07	0.05	NTT	RD	Minoru Nagase
15 25 08.80	0.03	TV	RD	Yoshitomi Shiraishi
15 27 21.40	0.03	JJY	RD	Tetsuya Matsunaga

† 電波時計を使用しての観測のため、後日その電波時計の誤差を JJY を用いて 測定したところ、その電波時計では 9Fr (0.30s) から 13Fr (0.43s) の 遅れが検出された。その遅れは報時電波を受け取って自動調整してからの時間の 1 次式で良く近似できることがわかったため、その式で補正して現象時刻を求めた。

‡ 現象時には時報が録音されていなかったが、15h07m01s, 15h08m01s, 15h09m00s, 15h15m58s, 15h17m01s の BPM の信号のフレームと現象のフレームを特定し、それら相互のフレーム数をカウントして内挿により求めた。その結果、このビデオのレートは規定の 29.97 Fr/sec よりやや小さい 29.944 Fr/sec であることがわかった。

1999年1月5日 レグルス (ZC 1487)

UTC	Acc	Signal	Phen	Observer
h m s	s			
13 28 23.55	0.03	JJY	DB	Yoshiki Shimizu
13 29 04.22	0.03	NTT †	DB	Miyoshi Ida
13 29 35.80	0.05	NTT ‡	DB	Noribumi Matsuura
13 31 54.30	0.05	NTT	DB	Mamoru Urabe
13 31 52.43	0.07	JJY	DB	Kazuhisa Miyashita
14 29 47.27	0.03	JJY	RD	Tsutomu Hayamizu
14 30 56.07	0.03	JJY	RD	Kouji Maeda
14 36 42.81	0.03	BPM	RD	Noriaki Kudo
14 36 48.10	0.03	NTT §	RD	Yoshiki Shimizu
14 36 56.37	0.03	NTT †	RD	Miyoshi Ida
14 37 53.97	0.05	NTT ‡	RD	Noribumi Matsuura
14 38 50.23	0.03	WWV	RD	Kazuhisa Miyashita
14 39 11.08	0.03	JJY	RD	Akira Matsui
14 41 24.19	0.03	TV	RD	Yoji Kawanishi
14 42 04.20	0.05	NTT	RD	Mamoru Urabe

† NTT の時報と JJY が同時に録音されている部分があり、それにより NTT の時報が 1 Fr 遅れていることが測定できたので、現象時刻にはそれを加味してある。

‡ IDO の携帯電話によるもの。電話の時報の遅れを調べるため、観測地で IDO による時報と JJY や WWVH を同時に録音して IDO の時報の遅れを数回測定したところ、IDO の時報の遅れは 0.18s から 0.22s であった。そこで IDO の時報の遅れは $0.20s \pm 0.02s$ とした。現象時刻の測定精度 $\pm 0.05s$ はこれにビデオ測定精度 $\pm 0.03s$ を加味したものである。

§ NTT の時報と JJY が同時に録音されている部分があり、それにより NTT の時報が 1.5 Fr 遅れていることが測定できたので、現象時刻にはそれを加味してある。

1999年2月23日 アルデバラン (ZC 692)

UTC	Acc	Signal	Phen	Observer
h m s	s			
13 14 00.77	0.03	JJY	DD	Yasuo Sano
13 14 30.09	0.03	WWVH	DD	Kazunori Sasano
13 15 46.02	0.10	TV †	DD	Hiroyuki Tsuda
13 19 41.73	0.05	NTT	DD	Yoshio Oba
13 19 52.63	0.07	TV §	DD	Makoto Watanabe
13 20 16.27	0.03	TV	DD	Yasuhiro Tonomura
13 20 42.69	*	BPM	DD	Noritaka Tokimasa
13 20 52.23	0.05	NTT	DD	Michinari Yamamoto
13 20 52.57	0.03	JJY	DD	Naoki Ootsuki
13 21 01.50	0.03	JJY	DD	Kazuhisa Miyashita
13 21 57.58	0.03	TV	DD	Akira Miyake
13 22 07.77	0.03	JJY	DD	Kaoru Ishii
13 22 52.63	0.03	JJY	DD	Yoshiki Shimizu
13 23 05.04	0.10	NTT ‡	DD	Yojiro Ogane
13 23 05.33	0.03	JJY	DD	Yasuharu Suzuki
13 23 06.11	0.03	BPM	DD	Toru Nakamura
13 23 08.83	0.03	JJY	DD	Mikiya Sato
13 23 11.90	0.03	WWVH	DD	S. & E. Fukatsu
13 23 11.90	0.03	TV	DD	Mitsuru Sôma
13 23 13.33	0.03	JJY	DD	Norio Sasanuma
13 23 13.63	0.03	JJY	DD	Masahisa Yanagisawa
13 23 15.95	0.03	TV	DD	Yoji Kawanishi
13 23 17.94	0.07	BPM	DD	Kiichi Hamada
13 23 36.30	0.03	JJY	DD	Masahiro Sanada
13 23 50.80	0.07	NTT	DD	Ryosaku Matsuzaki
13 24 30.17	0.05	NTT	DD	Mamoru Urabe
14 19 30.99	0.03	JJY	RB	Yoshiki Shimizu
14 20 24.12	0.03	WWVH	RB	Kazuhisa Miyashita
14 20 47.17	0.07	JJY	RB	Kaoru Ishii
14 21 14.35	0.03	TV	RB	Akira Miyake
14 21 21.66	0.07	WWVH	RB	Mikiya Sato
14 21 23.93	0.03	JJY	RB	Masahisa Yanagisawa
14 21 30.00	0.03	JJY	RB	Norio Sasanuma
14 21 49.03	0.08	NTT	RB	Mamoru Urabe

* +0.13-0.07

† テレビの画面でなく、現象といっしょにテレビ(BS1)の音声録音が録音されていたため、現象前後の比較的明瞭な音声数個のフレームを特定して時刻を測定した。ただし、音声のフレーム単位での特定は困難で、±2フレームの誤差が起こりうる。測定時刻精度は現象のフレームの特定誤差を加味して0.10sとした

‡ パソコンの時計をNTTの時報により合わせ、現象の画像をパソコンに取り込み測定した。時刻合わせは13h19m00sに行い、13h23m30sにチェックしたところ1ms以内で合っていたとのことであるが、手動によるため、時刻精度を0.10sとした。

§ NHK 総合テレビを録画して観測していたが、番組の境界が3ヶ所録画されており、それらが正確であるとして、現象時刻を求めた。総合テレビの番組の境界の時刻の精度については実測の結果、ときに10フレームを越える遅れのあることもある（これは、いくつかのチャンネルで同じ時刻に番組が切り替わる場合に、同じ時刻信号を計算機によってそれらのチャンネルに振り分けて使用しているために生じる誤差だということである）が、多くの場合、ほぼ1.5Fr以内であることが確認できている。

4. 解析

解析は月の暦に DE405 を、恒星の位置にヒッパルコス星表を用い、Sôma²²⁾の解析に基づき次のパラメータの値を用いた。

月の位置への補正: $\Delta\lambda = +0''.50$, $\Delta\beta = -0''.24$

月の半径: $R_0 = 1738.107$ km

Watts の月縁図の平均月縁への補正:

$$\Delta\rho = +0''.128 \sin 2(WA)$$

Watts 角 (WA = Watts Angle) と自転軸からの位置角 (AA = Axis Angle) との関係: $WA = AA + 0''.24$

ここで $\Delta\lambda$ と $\Delta\beta$ は平均距離 (384,400 km) における月の黄経・黄緯への補正量で、暦の与える月重心の位置から Watts の月縁図の平均月縁の中心の位置に直すためのものである。月の秤動は Eckhardt²³⁻²⁴⁾

による計算式を使用した。ただし、黄道に対する月の平均赤道傾斜角には IAU 1976 天文定数系の $1^\circ 32' 32''.7$ を採用した。

DE405 の月の位置とヒッパルコス星表の恒星の位置はいずれも ICRS に準拠している。これを J2000.0 年の地球の平均赤道と平均春分点に準拠した座標に直すため Chapront et al.²⁵⁾ によるパラメータの値を使用した。J2000.0 からの歳差と恒星時の計算には、IAU 1976 天文定数系による歳差定数に対する補正值として -3.266 mas/year を用いている Williams²⁶⁾ による式を、章動の理論には ZMOA 1990²⁷⁾ を使用した。恒星時の計算に必要な UT1 - UTC の値と瞬時の極に準拠した観測地の経緯度を求めるために必要な地球の極位置は IERS Bulletin B²⁸⁾ のデータを、日本測地系の準拠楕円体上の経緯度を世界測地系に変

換するためには水路部²⁹⁾による値を使用した。水路部による日本測地系変換パラメータの値は国土地理院による値³⁰⁾とほぼ1 m 以内で一致している。ただし、北海道や九州で数メートルに及ぶ日本測地系の内部歪みは考慮していない。観測地の標高はジオイドからの高さであるから、それにジオイド高を加えて楕円体表面からの高さに変換した。ジオイド高のデータは「日本のジオイド96」³¹⁻³²⁾を使用した。これはEGM96³³⁾に基づく値と一致している。

解析結果を表3-5と図1-3に示す。表中 WA は Watts の月縁図に用いられている位置角、Height は平均月縁からの高さ、WH は Watts の月縁図による月縁の高さ、Diff は WA と Height の差 (Height - WH), l と b はそれぞれ月の経度と緯度の秤動、Observer は観測者名、Phen は現象である。WH 欄にある記号の a は Watts の月縁データが外挿によって得られたもので精度が悪いことを意味し、b はその Watts の月縁データを得るのに大きな外挿を要し、は

表3 1998年10月9日のアルデバラン食の解析結果

WA	Height	WH	Diff	l	b	Observer	Phen
°	"	"	"	°	°		
38.76	-0.210	-0.18	-0.03	+6.10	+7.19	Tetsuya Matsunaga	DB
52.21	-0.635	-0.69	+0.05	+6.17	+7.14	Toshiyasu Funakoshi	DB
52.25	-0.628	-0.67	+0.04	+6.22	+7.14	Katsushi Nunomura	DB
53.67	-0.700	-0.84 a	+0.14	+6.24	+7.14	Michinari Yamamoto	DB
55.46	-0.413	-0.30	-0.11	+6.24	+7.13	Miyoshi Ida	DB
56.09	-0.262	-0.04	-0.22	+6.21	+7.13	Kaoru Ishii	DB
56.70	-0.092	+0.08	-0.17	+6.25	+7.12	Yoshiki Shimizu	DB
57.22	-0.266	-0.04	-0.23	+6.31	+7.12	Tsutomu Hayamizu	DB
58.09	-0.273	-0.21 a	-0.06	+6.21	+7.12	Mitsuru Sôma	DB
58.17	-0.492	-0.21	-0.28	+6.21	+7.12	Norio Sasanuma	DB
58.89	-0.712	-0.78	+0.07	+6.21	+7.12	Satoshi Suzuki	DB
282.86	-0.087	-0.14 a	+0.05	+6.15	+7.03	Ryosaku Matsuzaki	RD
283.04	+0.110	-0.20	+0.31	+6.14	+7.03	Satoshi Suzuki	RD
283.77	-0.430	-0.38	-0.05	+6.14	+7.04	Yoji Kawanishi	RD
283.85	-0.480	-0.45	-0.03	+6.13	+7.04	Norio Sasanuma	RD
284.88	-0.418	-0.56	+0.14	+6.28	+7.04	Tsutomu Hayamizu	RD
285.29	+0.094	-0.41	+0.51	+6.19	+7.04	Yoshiki Shimizu	RD
286.01	+0.214	-0.28	+0.49	+6.11	+7.05	Minoru Nagase	RD
286.02	+0.198	-0.24	+0.44	+6.15	+7.05	Kaoru Ishii	RD
286.62	+0.082	-0.20	+0.28	+6.18	+7.05	Miyoshi Ida	RD
288.01	-0.210	-0.49	+0.28	+6.22	+7.06	Hidegori Sato	RD
288.82	+0.256	-0.08	+0.33	+6.10	+7.06	Yoshitomi Shiraishi	RD
290.11	+0.109	-0.14	+0.25	+6.16	+7.07	Katsushi Nunomura	RD
290.36	+0.147	-0.13	+0.27	+6.10	+7.07	Toshiyasu Funakoshi	RD
305.10	+1.321	+1.57	-0.25	+6.04	+7.13	Tetsuya Matsunaga	RD

表4 1999年1月5日のレグルス食の解析結果

WA	Height	WH	Diff	l	b	Observer	Phen
°	"	"	"	°	°		
62.56	-1.360	-1.82	+0.46	+7.08	-0.51	Kazuhisa Miyashita	DB
66.47	-0.932	-1.15 b	+0.22	+7.10	-0.53	Miyoshi Ida	DB
66.65	-0.845	-1.03	+0.18	+7.10	-0.53	Noribumi Matsuura	DB
67.56	-1.205	-1.39	+0.18	+7.07	-0.53	Mamoru Urabe	DB
68.23	-1.376	-1.43	+0.05	+7.10	-0.53	Yoshiki Shimizu	DB
266.89	+0.878	+0.81 a	+0.06	+7.03	-0.65	Kouji Maeda	RD
266.93	+0.820	+0.77 a	+0.05	+7.04	-0.65	Tsutomu Hayamizu	RD
276.50	+0.075	-0.49 a	+0.56	+6.98	-0.60	Yoshiki Shimizu	RD
278.20	+0.373	-0.90 a	+1.27	+6.98	-0.59	Noriaki Kudo	RD
278.34	+0.413	-1.00 b	+1.41	+6.98	-0.59	Miyoshi Ida	RD
278.45	+0.351	-1.00 b	+1.35	+6.97	-0.59	Noribumi Matsuura	RD
278.72	+0.400	-0.88 b	+1.28	+6.93	-0.59	Mamoru Urabe	RD
280.85	+0.160	-0.69 a	+0.85	+6.93	-0.58	Yoji Kawanishi	RD
282.97	+0.041	-0.84 a	+0.88	+6.96	-0.57	Kazuhisa Miyashita	RD
283.06	-0.042	-0.91 a	+0.87	+6.95	-0.57	Akira Matsui	RD

表5 1999年2月23日のアルデバラン食の解析結果

WA	Height	WH	Diff	l	b	Observer	Phen
85.20	+0.751	+0.72	+0.04	+1.57	+6.95	Yasuo Sano	DD
86.86	+0.051	+0.26	-0.21	+1.56	+6.94	Kazunori Sasano	DD
87.22	+0.251	+0.22	+0.03	+1.55	+6.94	Hiroyuki Tsuda	DD
104.73	+0.762	+0.70	+0.06	+1.52	+6.85	Yasuhiro Tonomura	DD
105.81	+0.622	+0.83	-0.21	+1.53	+6.85	Yoshio Oba	DD
111.68	-0.547	-0.35	-0.20	+1.51	+6.82	Akira Miyake	DD
113.23	-0.557	-0.09	-0.47	+1.54	+6.82	Makoto Watanabe	DD
113.81	-0.171	+0.33	-0.50	+1.53	+6.81	Kazuhisa Miyashita	DD
114.73	-0.362	-0.06	-0.31	+1.51	+6.81	Norio Sasanuma	DD
114.84	-0.280	-0.10	-0.18	+1.51	+6.81	Yoji Kawanishi	DD
114.91	-0.207	-0.11	-0.09	+1.51	+6.81	S. & E. Fukatsu	DD
114.97	-0.318	-0.12	-0.20	+1.51	+6.81	Yasuharu Suzuki	DD
115.04	-0.369	-0.14	-0.23	+1.51	+6.81	Yojiro Ogane	DD
115.05	-0.380	-0.14	-0.24	+1.52	+6.81	Kaoru Ishii	DD
115.09	-0.315	-0.16	-0.16	+1.51	+6.81	Mitsuru Sōma	DD
115.11	-0.297	-0.16	-0.13	+1.51	+6.81	Mikiya Sato	DD
115.13	-0.213	-0.17	-0.04	+1.51	+6.81	Kiichi Hamada	DD
115.15	-0.185	-0.18	-0.01	+1.51	+6.81	Masahisa Yanagisawa	DD
115.33	-0.383	-0.27	-0.12	+1.51	+6.81	Toru Nakamura	DD
116.38	+0.187	+0.30	-0.12	+1.51	+6.80	Masahiro Sanada	DD
116.70	+0.217	+0.46	-0.24	+1.50	+6.80	Mamoru Urabe	DD
117.34	+0.833	+0.92	-0.09	+1.51	+6.80	Ryosaku Matsuzaki	DD
119.27	-0.235	-0.09	-0.14	+1.54	+6.79	Michinari Yamamoto	DD
119.32	-0.172	-0.03	-0.14	+1.54	+6.79	Naoki Ootsuki	DD
120.95	-0.456	-0.28	-0.18	+1.54	+6.78	Noritaka Tokimasa	DD
121.46	-0.566	-0.41	-0.16	+1.53	+6.78	Yoshiki Shimizu	DD
244.38	+0.044	-0.07	+0.11	+1.49	+6.80	Yoshiki Shimizu	RB
249.72	+0.011	-0.10	+0.11	+1.47	+6.83	Mamoru Urabe	RB
250.98	+0.382	+0.63	-0.25	+1.49	+6.83	Kaoru Ishii	RB
251.10	+0.174	+0.60	-0.43	+1.48	+6.83	Masahisa Yanagisawa	RB
251.13	+0.241	+0.59	-0.35	+1.48	+6.83	Mikiya Sato	RB
251.56	+0.941	+0.94	+0.00	+1.48	+6.84	Norio Sasanuma	RB
252.07	+1.158	+1.39	-0.23	+1.49	+6.84	Kazuhisa Miyashita	RB
254.46	+0.068	-0.02	+0.09	+1.49	+6.85	Akira Miyake	RB

ほとんど意味のないデータであることを意味する。

解析結果から、1998年10月9日のアルデバラン食からは全体として潜側でWattsのデータが0°.2ほど高すぎ、出現側では同程度低すぎるのがわかる。1999年1月5日のレグルス食からは出現側でWattsのデータの無い部分の月縁データが得られた。また、この日の月の緯度の秤動値は $b = -0.53$ 前後(潜入時)から $b = -0.59$ 前後(出現時)で0°に近く、日食の解析には特に重要なデータとなる。1999年2月23日のアルデバラン食からは特にWatts角が115°付近にWattsのデータにはなかった山と谷のあることが明らかになった。

5. まとめ

星食のビデオ観測から精密な月縁データが得られることが明らかになった。これらのデータは今後の日食観測の解析やヒッパルコス星表の誤差解析に役立てられる。

今回の星食ビデオ観測キャンペーンを契機にして、星食を定常的にビデオによって観測して下さる方が増え、一人で年間に数十個もの観測をされる方も

出てきた。これも今回のキャンペーンの大きな収穫である。今後も星食観測を呼び掛けて、良質のデータを多数獲得できるようにしていきたい。

謝辞

観測にご協力くださった多くの方々に感謝する。また、新聞記事にて観測を呼び掛けてくださった共同通信社科学部を始めとする多くの地方新聞社、ニフティサーブのスペースフォーラム掩蔽会議室で観測を呼び掛けてくださった掩蔽観測グループの戸田雅之氏、ホームページで観測を呼び掛けてくださった北大天文同好会の松永哲也氏、国立天文台のホームページの「情報・お知らせ」の欄に呼び掛け文を掲載くださった国立天文台天文情報公開センター広報普及室にも感謝する。

参考文献

- 1) Dunham, D.W.: "Current Value of Timings of Total Lunar Occultations", *Occultation Newsletter*, **6**, 411 (1997).

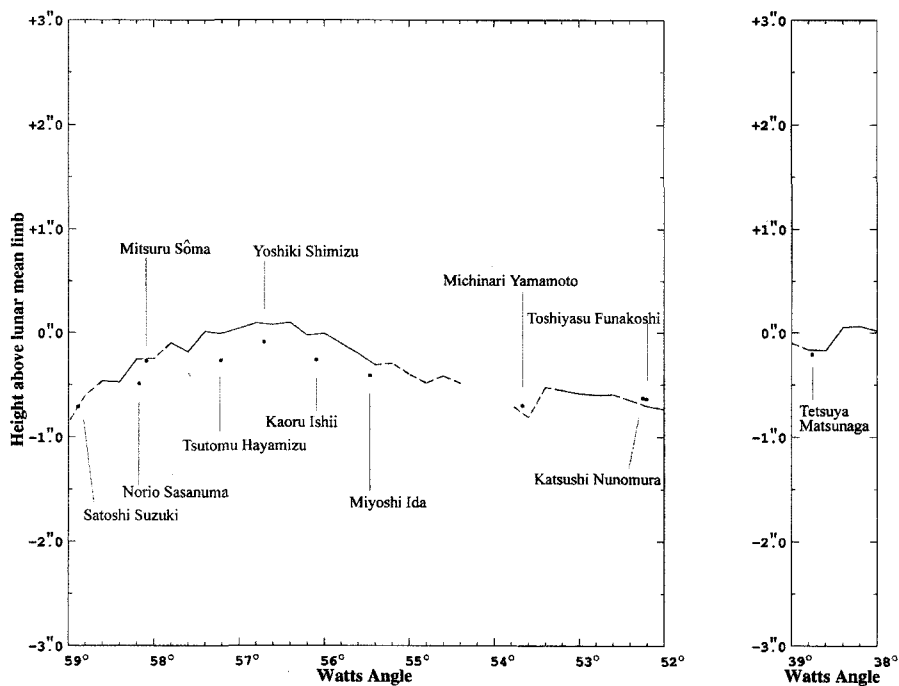


図1 a)

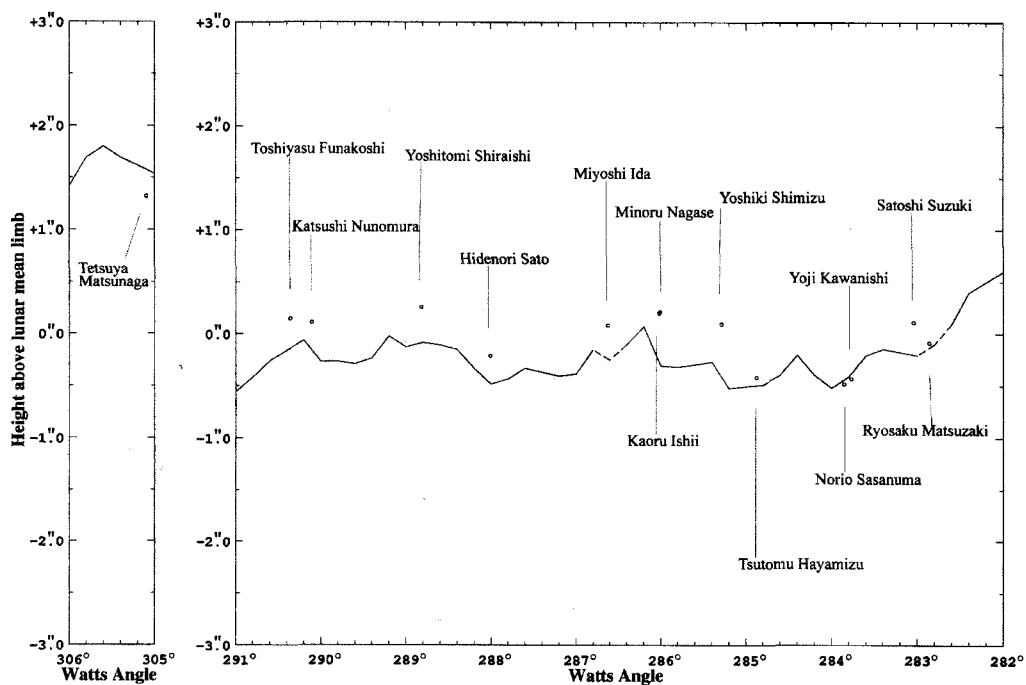


図1 b)

図1 a) 1998年10月9日のアルデバラン（潜入）による月縁

b) 同（出現）による月縁

横軸はワッツ角（度）、縦軸は平均月縁からの高さ（秒角）で月の平均距離（384,400km）における値に換算してある。月縁の1度は約16秒角に相当するので、縦方向のスケールは横方向に対して19倍に拡大されて作図されていることになる。丸印が今回の星食観測によるデータ、折れ線はWattsによるもので破線部分は外挿によるため精度が悪いことを意味する。

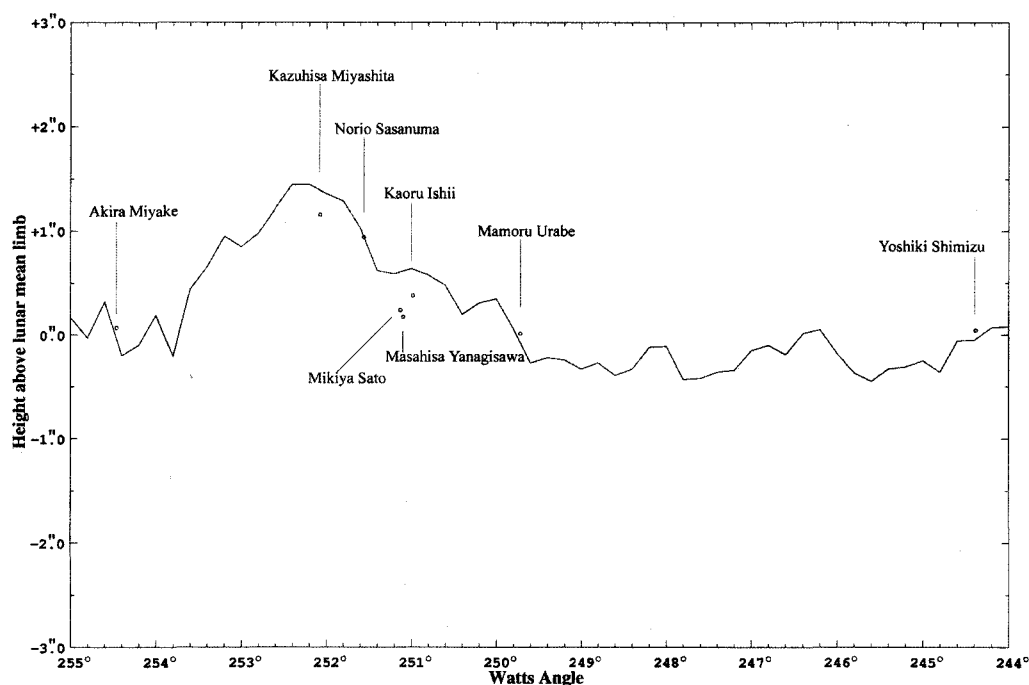


図3 c)

図3 a-b) 1999年2月23日のアルデバラン食(潜入)による月縁
 c) 同(出現)による月縁
 説明は図1参照.

- 2) Smith, D.E., Zuber, M.T., Neumann, G.A., & Lemoine, F.G.: "Topography of the Moon from the Clementine Lidar", *J. Geophys. Res.*, **102**, No. E1, 1591–1611 (1997).
- 3) Cook, A.C., Watters, T.R., Robinson, M.S., Spudis, P.D., & Bussey, D.B.J.: "Lunar Polar Topography Derived from Clementine Stereoimages", *J. Geophys. Res.*, **105**, 12,023–12,033 (2000).
- 4) Margot, J.L., Campbell, D.B., Jurgens, R.F., & Slade, M.A.: "Topography of the Lunar Poles from Radar Interferometry: A Survey of Cold Trap Locations", *Science*, **284**, 1658–1660.
- 5) Watts, C.B.: "The Marginal Zone of the Moon", *Astron. Papers Am. Ephemeris*, **17**, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., U.S.A. (1963).
- 6) Morrison, L.V. & Appleby, G.M.: "Analysis of Lunar Occultations—III. Systematic Corrections to Watts' Limb-profiles for the Moon", *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **196**, 1013–1020 (1981).
- 7) Rosselló, G. Jordi, C., & Salazar, A.: "Corrections to Watts' Charts Varying with Libration", *Astrophys. Space Sci.*, **177**, 331–338 (1991).
- 8) Kubo, Y.: "Examination into Error of Watts' Datum and Recomputation of Moon's Position", *Report of Hydrographic Researches*, No. 30, 37–47 (1994).
- 9) Sôma, M.: "Lunar Occultations Observed in Japan and Lunar Limb Profiles Derived", in: P-S. Chen (ed.) *Observational Astrophysics in Asia and its Future* (Proceedings of Fourth East-Asia Meeting on Astronomy), Yunnan Observatory, Yunnan, China, 254–258 (1999).
- 10) Sôma, M.: "Limb Profiles of the Moon Obtained from Grazing Occultation Observations", *Publ. Natl. Astron. Obs. Japan*, **5**, 99–119 (1999).
- 11) Fiala, A.D., Dunham, D.W., & Sofia, S.: "Variation of the Solar Diameter from Solar Eclipse Observations, 1717–1991", *Solar Phys.*, **152**, 97–104 (1994).
- 12) Sofia, S., O'Keefe, J., Lesh, J.R., & Endal, A.S.: "Solar Constant: Constraints on Possible Variations Derived from Solar Diameter Measurements", *Science*, **204**, 1306–1308 (1979).
- 13) European Space Agency: "The Hipparcos Catalogue", ESA SP-1200 (1997).

- 14) McCarthy, D.D., & Luzum, B.J.: "Observations of Luni-Solar and Free Core Nutation", *Astron. J.*, **102**, 1889–1895 (1991).
- 15) Williams, J.G., Newhall, X X, & Dicky, J.O.: "Luni-Solar Precession: Determination from Lunar Laser Ranges", *Astron. Astrophys.*, **241**, L9–L12 (1991).
- 16) Miyamoto, M. & Sôma, M.: "Is the Vorticity Vector of the Galaxy Perpendicular to the Galactic Plane? I. Precessional Correction and Equinoctial Motion Correction to the FK5 System", *Astron. J.*, **105**, 691–701 (1993).
- 17) Feissel, M., & Mignard, F.: "The Adoption of ICRS on 1 January 1998: Meaning and Consequences", *Astron. Astrophys.*, **331**, L33–L36 (1998).
- 18) Standish, E.M.: "JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405", JPL IOM 312.F-98-048 (1998).
- 19) Sôma, M.: "Examination of the Hipparcos Proper Motion System from Lunar Occultation Analysis", in: K.J. Johnson, D.D. McCarthy, B.J. Luzum, G.H. Kaplan (eds.) *Towards Models and Constants for Sub-Microarcsecond Astrometry* (IAU Coll. 180), U.S. Naval Observatory, Washington, D.C., U.S.A., pp. 115–119 (2000).
- 20) 青木信仰: 「時と暦」, 東京大学出版会, p. 230 (1982).
- 21) 早水勉, 下代博之, 相馬充: 「星食から生まれた GHS 時計」 *天文月報*, **93**, 720–727 (2000).
- 22) Sôma, M.: "An Analysis of Lunar Occultations in the Years 1955–1980 Using the New Lunar Ephemeris ELP2000", *Celes. Mech.*, **35**, 45–88 (1985).
- 23) Eckhardt, D.H.: "Theory of the Libration of the Moon", *The Moon and the Planets*, **25**, 3–49 (1981).
- 24) Eckhardt, D.H.: "Planetary and Earth Figure Perturbations in the Librations of the Moon", in Calame, O. (ed.) *High Precision Earth Rotation and Earth-Moon Dynamics* (IAU Coll. 63), pp. 193–198 (1982).
- 25) Chapront, J., Chapront-Touzé, M., & Francou, G.: "Determination of the lunar orbital and rotational parameters and of the ecliptic reference system orientation from LLR measurements and IERS data", *Astron. Astrophys.*, **343**, 624–633 (1999).
- 26) Williams, J.G.: "Contributions to the Earth's Obliquity Rate, Precession, and Nutation", *Astron. J.*, **108**, 711–724 (1994).
- 27) Herring, T.A. 1991, "The ZMOA-1990 Nutation Series", in: Hughes, J.A., Smith, C.A., & Kaplan, G.H. (eds.) *Reference Systems* (IAU Coll. 127), USNO, Washington D.C., pp. 157–166 (1991).
- 28) International Earth Rotation Service: Bulletin B (published monthly) (1999).
- 29) 辰野忠夫: 「人工衛星レーザー測距をドップラー観測による海洋測地網二次基準点の位置決定成果」水路部研究報告, No. 30, 1–17 (1994).
- 30) 飛田幹男: 「最近の測地座標と座標変換についての考察」測地学会誌, **43**, 231–235 (1997).
- 31) 黒田次郎, 高畑嘉之, 松嶋成佳, 福田洋一: 「LSC 法による GPS/水準測量と重力ジオイドの統合」国土地理院時報 No. 87, 1–3 (1997).
- 32) 国土地理院: 「日本のジオイド高分布図」国立天文台編「理科年表」1998年版, p. 886 (1997).
- 33) National Imagery and Mapping Agency: "Department of Defense World Geodetic System 1984: Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems", NIMA TR8350.2 (1997).