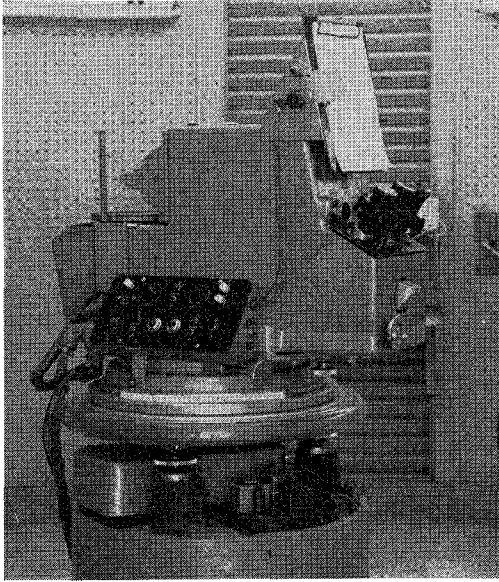


水沢のダンジョン・アストロラープ

横 山 紘 一*



1. まえがき

緯度変化すなわち極運動の問題は、18世紀後半オイラーによって理論づけられて後、観測的には、1885年頃キュストナーとチャンドラーによって独立に実証された。その後北緯 $39^{\circ}08'$ 上で世界共同緯度観測事業が1899年に開始されて今日に至っている。

極運動の結果地球上のある一点の座標すなわち経度と緯度は相当の変化を受ける。逆に観測によって地球上の数点の経緯度変化をつかんだとすれば、その結果から極軸がどの程度動いたかがわかる訳である。この現象の観測に用いられる望遠鏡は種々あって、それぞれその目的と方法が異なる。現在水沢にあるものは緯度変化だけを追跡するものとして、VZT（眼視天頂儀）とFZT（浮遊天頂儀）があるが、特に前者はこの事業が始って以来、ずっと使われている安定した精度の望遠鏡である。経緯度共に観測できるものにPZT（写真天頂筒）とアストロラープがある。この両者は観測方法において大きな違いがあるが、共に高精度の望遠鏡として汎く世界中で使用されている。

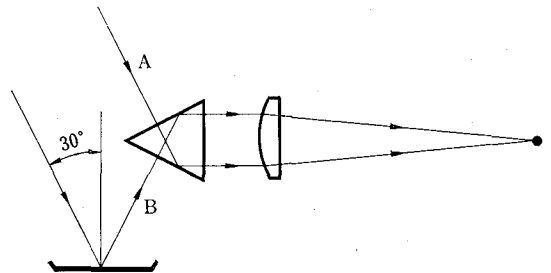
プリズムを用いる等高度観測法が考えられたのは今から160年ほど前ガウスによってであった。現在の“個人

差のないアストロラープ”が胎動を始めたのは、第2次大戦直前で、ダンジョンによるものである。彼はその頃口径6cmのプロトタイプ・アストロラープを試作し、その実験の結果に自信を得て、1946年からパリ天文台で種々のテストを開始した。そして口径12cmの実験器を経て、今日の10cmのダンジョン・アストロラープをパリのO.P.L.社と共に、開発することに成功したのである。この望遠鏡では、後述するウォラストン・プリズムを導入することによって、時刻記録の精度を上げることができるようになった。

一方国際地球観測年の計画の中に世界中の経緯度決定プログラムも含まれることになり、経緯度を同時に決定できる器械によるFK3星の観測が望ましいという勧告が為されたのであったが、観測星を基本星のみで構成できるのはアストロラープだけである。このような経緯を経て、1956年7月パリ天文台で正規の観測が始まり、以後世界各国に拡がって行き、水沢では1年間の練習の後1966年1月から開始した。採用経緯度は $\lambda=9^{\text{h}}24^{\text{m}}31^{\text{s}}.602\text{E}$, $\varphi=39^{\circ}08'03''.4\text{N}$ である。

2. 原 理

第1図で対物レンズ前面に正三角形プリズムと反射鏡（水銀）を置くことによって星の光を、直接プリズムに入るものAと水銀面で反射してプリズムに入るものBとの2つの光束に分けることができる。星が日周運動によって次第に「高度 60° の小円」（以下アルムカンターという）に近づくると2つの星像も視野の中で徐々に近づき遂には一致する。この瞬間が星のアルムカンター通過時刻という訳である。これを t_0 とする。一方視位置から星のアルムカンター通過時刻をあらかじめ計算してこれを t_0 とすれば、観測値と計算値の差いわゆる（O-C）がわかる。この（O-C）を高度方向の成分で表わした



第1図

* 緯度観測所

K. Yokoyama: Danjon Astrolabe at Mizusawa

ものを δh_i とすれば

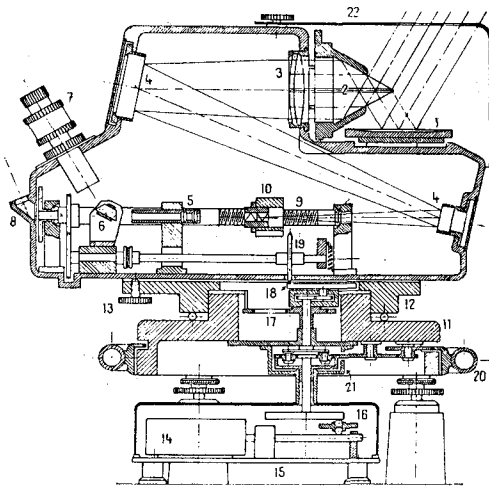
$$\delta h_i = 15 \cdot \cos \varphi \cdot \sin A_i \cdot (t_o - t_c) \quad (1)$$

となる。(1)式には、極運動および地球の自転速度の変動分が現象として含まれ、その外に用いている星表の位置の誤差等も含まれている。この δh_i を使って条件方程式は

$$15 \cdot \cos \varphi \cdot \sin A_i \cdot \Delta T + \cos A_i \cdot \Delta \varphi - z + \delta h_i = 0 \quad (2)$$

となる。上の2つの式で φ は仮定緯度、 A_i は星の方位角で北から東廻りに 360° まで測ったもの、 ΔT は時計面への補正值、 $\Delta \varphi$ は仮定緯度への補正值、 z は正三角形プリズムの角度の誤差である。添字 i は1群中の星の番号を表わす。(2)式を1群約30星について最小自乗法で解けば、 ΔT 、 $\Delta \varphi$ 、 z の未知数の値が得られる。観測星群を選択するに当っては各方位に均等に星が分布するように留意することが大切である。 ΔT の精度に寄与するのは卯酉線近傍の星であり、 $\Delta \varphi$ の精度は子午線近傍の星により依存する。しかし器械的理由により子午線から方位角にして 15° 以内の範囲では観測不可能である。このためどうしても経度決定の方に重みがかかってしまう。したがって観測星の分布は各象限の中心に重心を持つように配慮されている。

天頂儀、PZT 等が天頂付近に限定された1次元的な観測とすれば、アストロラープはアルムカンター上の星



第2図 アストロラープの断面図

1. 水銀皿 2. プリズム 3. 対物レンズ 4. 平面反射鏡 5. レンズ 6. 屈折プリズム 7. アイピース 8. マイクロメータードラム読み取り用プリズム 9. ウォラストン駆動用ネジ 10. ウォラストン・プリズム 11. 支持台 12. 13. レベル調節部分 14. DC モーター 15. 変速器 16. 第一差動器 17. ギヤ 18. 第2差動器 19. ギヤ 20. 手動微調ハンドル 21. 微調ギヤ 22. カバー

を観測するから2次元的ともいえるしそのため星の選択にかなり自由な所があって基本星系の中だけから選べるのである。水沢の場合 FK 4 星系からそのほとんどを採り、FK 4 Supp. からもわずかに取り入れている。12群でのべ342星は其中、77星は東側と西側の両方のアルムカンター通過がとられている。

3. ダンジョン・アストロラープの機構

第2図に、ダンジョン・アストロラープの断面図を示す。口径は10cm、焦点距離100cm、倍率175倍である。

ダンジョン・アストロラープは機構上凡そ特徴的に以下の3つの部分に分けて考えてよいと思う。

- a. 直接像と間接像を作るための正三角形プリズムおよび水銀反射鏡、
- b. ウォラストン・プリズムとその動きに合わせて信号を出す接点部分、
- c. ウォラストン・プリズム駆動用モーターと方位角に伴う自動変速機構と手動微調ハンドル。

以下順次説明を加える。

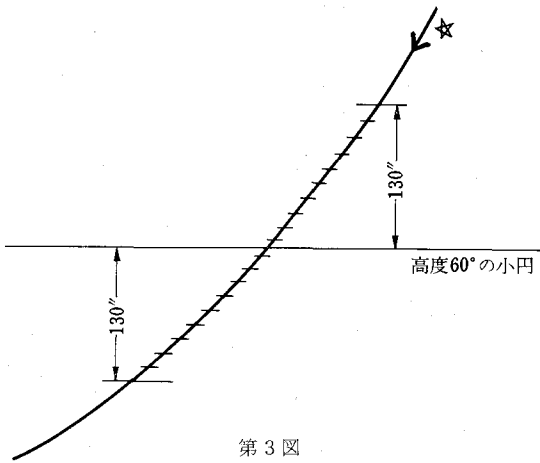
a. について

正三角形プリズムは工作上わずかながら誤差を含むが、これは本質的な問題ではない。というのは、(2)式の z で逃げるができるからである。むしろ問題はプリズム角の温度変化の大きさである。1群の観測でこれが無視できないほど大きいとすればもはや(2)式はなりたたなくなるからである。実際は1群90分の間の外気温の変化はせいぜい 5°C と思ってよいし、この位ではプリズム角は安定している。しかし観測開始少なくとも1時間前から十分外気になじませておく必要がある。一方水銀反射鏡はそれが液体であることによって鉛直線方向すなわち天頂方向は常に保証されている。したがって観測高度はプリズム角のみで決まる。また望遠鏡のセッティングには子午線望遠鏡のような厳密性は要求されない。40''位の精度でセットしておいて、後は各星に対してレベルを調整して光軸を中心に直接像と反射像を合わせればよいのである。観測の最短時間間隔は凡そ1.5分であるが、水銀皿が浅いので、水銀面の振動は速かに減衰する。

b. について

アルムカンターを星がよぎる時刻を高精度で得るためには、前述のように2つの星像の交差の瞬間を唯一度だけ記録するだけでは不十分である。アルムカンターから上下に約 $130''$ ずつ離れた間で星を追跡し(子午線近傍では約 $65''$) その間20個の記録をとりその平均値を求める方法が考えられた。(第3図)

この目的のために用いられたのが、ウォラストン・プリズムであって、これを対物レンズの焦点に置き、星の



第3図

日周運動に合わせて動かしてやればよい。

第4図で A, B が2つの星像とする。ウォラストン・プリズムを導入すると、それぞれ2つの偏光光線 A_1A_2 , B_1B_2 が得られる。プリズムを光軸に沿って適当な速さで動かすことで A_1 と B_2 の関係を一定に保つことができる。その速度は星の日周運動の天頂距離成分 dz_i/dt である。そうすると

$$A_1A_2 = B_1B_2 = AB \quad (3)$$

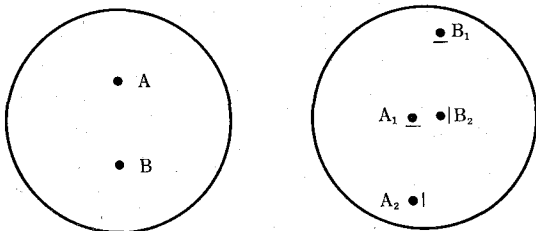
なる関係がいつも保たれる。

ここで

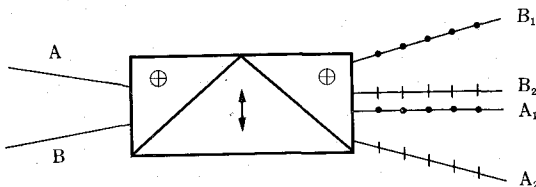
$$\frac{dz_i}{dt} = -\cos \varphi \cdot \sin A_i \quad (4)$$

である。

前述の関係を別に表わすと第5図になる。 A_1 と A_2 の角度 B_1 と B_2 の角度は A と B の角度と全く等しい。そして A_1 と B_2 は平行でありプリズムが正しく動いている限りその間隔も変らない。 B_1 と A_2 は適当なスクリーンを使って視野から消されるから、実際観測者にみえるのは A_1 と B_2 である。その間隔は接眼鏡の焦点に



第4図



第5図

よって変ることはない。第6図で A_1B_2 が最終的には $\sigma_1\sigma_2$ として追跡されるのである。視野の広さは凡そ $12'$ である。初め A_1, B_2 が入ってくるが両者が十分近づいて真中の2本の横線の $1/3 \sim 1/2$ 位の間隔になった時にウォラストン・プリズムを駆動する。その際追尾を簡単にするために、駆動する直前正三角形プリズムを故意に光軸の廻りに少し回転させて2つの星像をねじまげて $\sigma_1\sigma_2$ のように水平に乗せる。そうするとウォラストン・プリズムが正しく日周運動を追っているかどうかは $\sigma_1\sigma_2$ の水平度で判定できるので観測が容易になるという訳である。もし上下に星像がずれたら手動の微調ハンドルでウォラストン・プリズムの速さを調整する。このウォラストン・プリズムの動きをメカニカルコンタクトで信号に変換するのである。

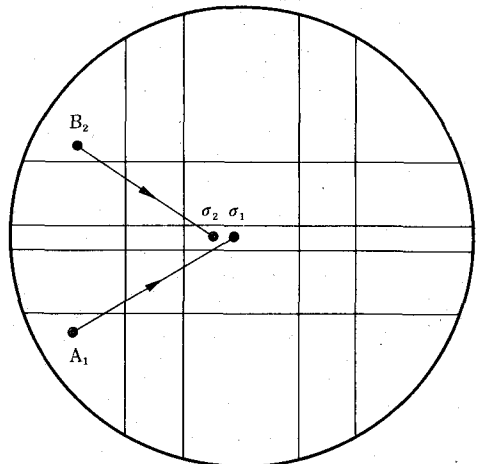
c. について

ウォラストン・プリズムを駆動するのは 12V の DC モーターであり、円板を廻しておいてその円板にウォラストンへ動力を伝えるもう一つの円板を直角にあて摩擦力で駆動する。方位角による速度の変換は回転している円板のどこに当るかというその半径で決まる。

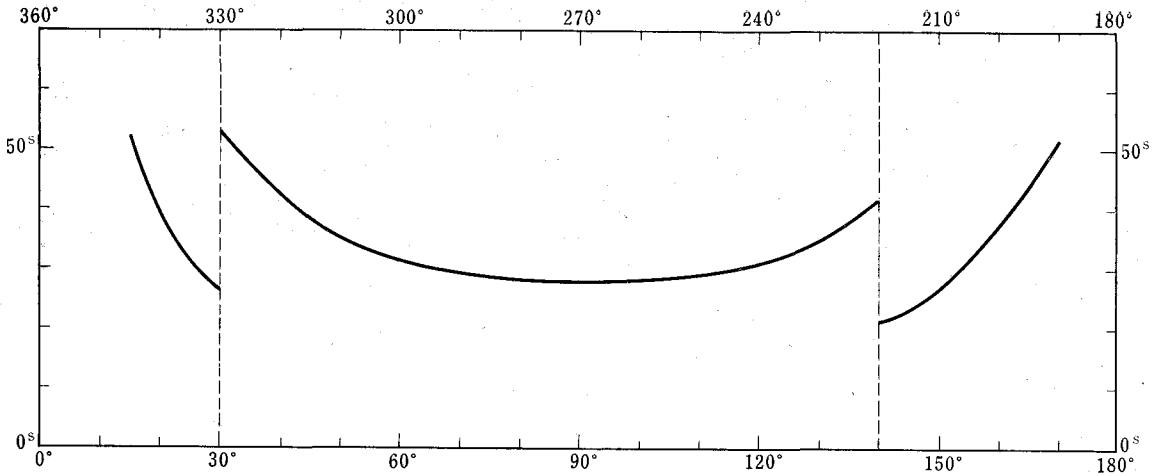
メカニカルな接点はウォラストン・プリズム駆動用ネジに直結したドラムについており2系列ある。1つは2信号/1回転、もう1つは4信号/1回転である。方位角によってどちらを使うかが決まる。第7図に方位角と1星の観測時間との関係を図示する。点線の外側は4信号/1回転の系列を使う範囲である。何故なら南の場合天頂距離差を半分にしなないと視野に入り切れず、北の場合時間がかかり過ぎるからである。

4. 時刻記録装置

1星の観測は24個の信号をもって終了する。第8図にその様子を示す。点線が平均時刻でアルムカンター通



第6図



第 7 図

過の瞬間に対応する。信号の 1 と 2 および 23 と 24 は記録器の制御に必要であるから、時刻記録には真中の 20 個の信号だけが使われる。現在用いている記録装置は 2 つあって、1 つはデータ・プロセッシング・ユニット（新電子工業 KK 製作）で、6 単位の紙テープに $0^{\circ}0001$ の精度で 20 個の時間間隔を打ち出す、1 つはパンチング・クロノグラフ（小野測機 KK 製作）で同じく 20 個の今度は時刻を 2 枚のカードに打ち出す。標準時計は水沢の標準周波数であるセシウム原子時計の 100 KHz を分周して用いている。時計は各分の 0 秒、20 秒、40 秒にリセットパルスを出すので時刻記録がそのどれを基準にしているかは整約計算の中で判定しなければならない。ちなみに PZT では秒以下だけの記録で足りるのである。

データ・プロセッシング・ユニットの場合時刻記録を $t_i (i=1, 20)$ とすると平均時刻 t_m は

$$t_m = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \{(21-i) \cdot t_i\} \quad (5)$$

であり、パンチング・クロノグラフの場合

$$t_m = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} t_i \quad (6)$$

となる。第 9 図に記録装置の写真を示す。

5. あとがき

水沢では 1969 年 12 月までの 4 年間に合計 680 群約 17,000 星を観測したことになる。経緯度の決定精度は平均自乗誤差で表わすと ΔT で $\pm 0^{\circ}006$ 、 $\Delta \varphi$ で $\pm 0^{\circ}08$ であるが最も良い時の値でそれぞれ $\pm 0^{\circ}003$ と $\pm 0^{\circ}02$ である。

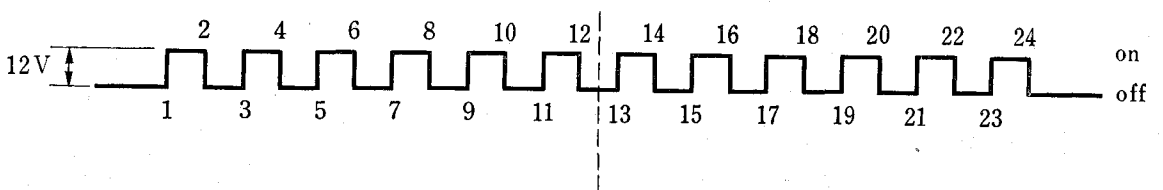
第 10 図は 1968 年 12 月 19 日の第 5 群の観測の δh_i を図示したもので、(2) 式を関式的に解いたものと考えればよい。 ΔT の近似値としてすでに $0^{\circ}497$ を入れてある。

アストロラープ観測では 1 群約 90 分の観測について 1 組の経緯度が得られる訳であるから、PZT が 1 星毎、VZT, FZT が一星対毎にそれぞれ値が得られることを思えば不経済な面もあるし、短周期の変動が結果に現われてこないという面もある。しかし前述のとおり基本星でプログラムを組めるという利点があるので基本星系の改良という面でこれから増々大きな意味を持つであろう。

(2) 式を解くと各星について残差 R_i が現われるが、その原因は星の位置の誤差によるものと考えられ

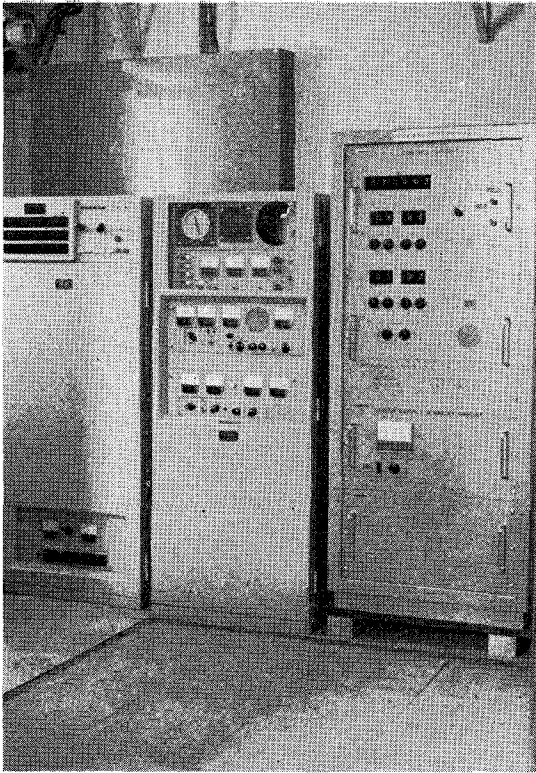
$$R_i = 15 \cdot \cos \varphi \cdot \sin A_i \cdot \Delta \alpha_i - \cos S_i \cdot \Delta \delta_i \quad (7)$$

なる関係が得られる。 $\Delta \alpha_i$, $\Delta \delta_i$ はそれぞれ赤経と赤緯の補正值である。もし同じ星がアルムカンターの東西両側で観測されるならば (7) 式は直ちに解ける。しかし S_i (極頂対角) が 90° 付近では小分母のため $\Delta \delta_i$ が解けな



アルムカンター通過に対応する

第 8 図



第9図 左からデータ・プロセッシング・ユニット、時計、パンチング・クロノグラフ

い、この範囲は水沢で $33^\circ < \delta < 55^\circ$ であり、パリでは $50^\circ < \delta < 68^\circ$ である。このように観測地点の緯度によって、その範囲が異なるから観測点を少しずつずらして世界中に分布させることでお互いにカバーしていくことが必要である。

器械的問題として一番問題になるのは時刻記録の接点部分である。メカニカルな接点では、チャタリングとか接点の摩滅とかの問題が生じやすい。たとえばハーストモンスーでは、ドラムについた目盛を写真にとる方法が採用されている。水沢では磁気を用いた無接点スイッチをこれに応用する方法を検討中である。

また1群の中20個近い星をとらなければ、データとなり難い観測なので、天候の状態に大きく左右される。もっと効率を良くするために群の観測時間短縮などということも考える必要があるかも知れない。

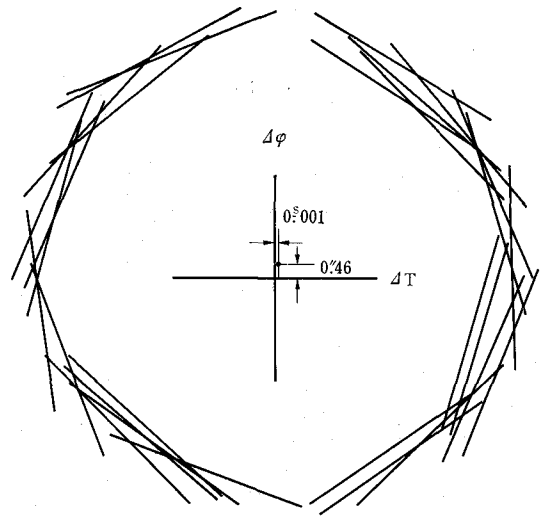
面白い試みとしてはアストロラープによる惑星、小惑星の観測がある。これはパリ天文台のデバルバ嬢が現在精力的に行なっているがその他でも、ブザンソン、ポツダム、ジカウェイ、アルジェ、キトーでも行なった報告

がある。水沢でも1966年11月から翌年3月まで木星の観測を試みた。観測方法は恒星の場合と全く同じであるが、視直径が大きいため(凡そ $45''$) 精度が些か悪くなるのは致し方ない。観測された木星が必ずいずれかの観測群に属するものとして、その群の $\Delta T, \Delta \varphi, z$ を用いて計算する。天体暦にある位置から求めた木星の高度を用いて(7)式から $\Delta \alpha_J, \Delta \delta_J$ を計算する。第1表に木星観測の結果を示す。

この他、月、火星、土星、等についても報告されている。基準座標系を決定するのに惑星観測が不可欠であるのは周知の事実である。アストロラープ観測は、相対観測とはいえ、このようにして力学座標系とのつながりを深めて行けば、必ずや星系の改良に大きな貢献をできるものと思うし、現在のこの種の試みは一つの可能性を示しているように見える。

第1表

観測所	$\Delta \alpha_J$	$\Delta \delta_J$	数	観測年
水 沢	$-0^{\circ}094 \pm 0^{\circ}015$	$-0^{\circ}69 \pm 0^{\circ}19$	13	1967
ジカウェイ	-0.044 ± 0.013	$+0.69 \pm 0.13$	22	1964
東 京 (子午環)	-0.031 ± 0.009	$+0.18 \pm 0.12$	34, 26	1962



1968 Dec. 19 GN 5
 $\varphi = 3^{\circ}36' \pm 0^{\circ}09'$
 $\Delta T = 0^{\circ}498 \pm 0^{\circ}007$

第10図