

渡海水準測量の方法と観測回数

The Method and Number of Observation in Crossing River (or Sea) Leveling

測 地 部 豊田 友夫
Geodetic Department Tomoo TOYODA

要旨

渡海水準測量は、これまで比較的短い距離に適用する俯仰ねじ法、長い距離に適用するトランシット法のいずれも1セットの対回数は、5対回(1対回は正・反観測)を1/2セットとし、南中時を対称にもう1/2セット観測として行ってきた。しかし、この方法では観測時間が長くなるため同時性が薄れ、特に観測距離が長い場合は、光路上の大気の違い(時間的)が観測精度に直結する。

また、午後の観測ができない気象条件となった場合は、1日の観測をすべて抹消することになり作業効率上の無駄が発生する。

対岸との同時観測を行っているのであれば、1セットを1対回の観測として観測時間を短くすることは、観測の同時性からみた精度確保と有効な作業効率に必要な事柄といえる。

1. はじめに

91年11~12月にトランシット4台を用いて実施した豊予海峡で、初めて1測点において1方向につき1対回をもって1セットとする、屈折率の変化が少ない短時間の同時観測を実施し良好な結果を得た。これにより95年11~12月の紀淡海峡の渡海水準測量へも適用し、これも良好な結果が得られた。これにより、現「水準測量作業規程(案)96/3/29」では、観測距離が5km以上のトランシットを用いる方法で1セットを1方向につき1対回の同時観測に改訂した。

本稿では、トランシットを用いる場合と気泡管レベルを用いる場合の観測セット数と観測回数について検討を行う。トランシットの場合は誤差から検証し、気泡管レベルの場合は以前の観測手簿の再計算の結果から求める。

また、距離ごとに区別している使用器械についても検討を加える。

2. 観測距離と測量方式

2.1 渡海水準測量の考え方

一般に水準測量の観測誤差は距離の平方根に比例するが、屈折率の影響は距離の二乗に比例するので、渡海水準測量においては、兩岸同時観測の方法が極めて重要である。

兩岸同時観測を実施しても、兩岸における屈折の状況が一定でない限りその影響は残る。また、日々の観測値に日毎の誤差が表れるのも誰もが経験することであり、この大部分は、屈折の影響と考えられる。

渡海水準測量の精度は、選点によって決定されるといってもよい。精度をよくするためには、視準線の間を境に兩岸渡海点の状況が対称的であること、これは、河原、海岸、水面などの地形、地物の現況にとどまらず、流水、流水方向、流速、風向、日照などについても同様である。これらの諸条件を勘案して観測点を決定しなければならない。

精度を確保するためには、観測点を海面からできるだけ高くすることは重要であるが、屈折の影響を考えると陸地部分は短いほどよい。距離の短縮と視準線を高く保つことは相反する条件となるが、このためには、測標を設けることも考慮しなければならない。

ボンフォード(Bomford)は、渡海距離(S)と海面高(h)の関係について次表のように示しているので一つの目安として参考にされたい。

表-1 渡海距離と海面高

S(km)	1	2	3	4	5	6
h(m)	2	4	9	15	22	30

2.2 観測距離と測量方式

現「作業規程(案)96/3/29」では、測量方式を渡海点間の距離に応じて、図-1のように決めている。

- A: 交互法(5m法) 約0.3kmまで
B: 俯仰ねじ法(気泡管レベル2台) 約2kmまで
C: 俯仰ねじ法(気泡管レベル4台) 約5kmまで

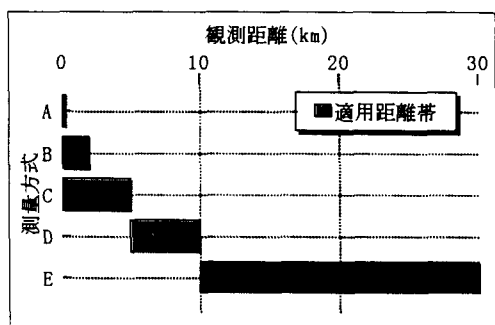


図-1 観測距離と測量方式

D: トランシット法 (トランシット2台) 5km以上

E: トランシット法 (トランシット4台) 10km以上
注) 図中トランシット4台法は、測定距離を30kmまでグラフ化しているが、これまでの最長距離は津軽海峡の約23kmであり、30kmまで有効か否か不明である。仮に、国後島、択捉島と北海道を結ぶならば、25kmを超過する渡海水準測量が必要となる。

図-2に俯仰ねじ法の模式図を示す。図からわかるようにこの測量方式は、兩岸の観測点をほぼ同じ高さを選定しなければならない。すでに述べたように渡海水準測量の精度は、視準線の間を境に対称的な観測点を選定することが最も重要な要因となるわけであるから、兩岸観測点が河川の堤防や海岸の護岸上で高さがほぼ等しい場所に設置できる場合はよいが、その他の地域では選定が難しい。

したがって、観測距離にあまりこだわらずに、トランシット法を用いるのも良好な結果を得るためには考慮しなければならない事柄の一つである。

兩岸観測点での器械交換を必要としない気泡管レベル4台を使用する方法は、迂回路が遠距離になる場合や船便がない場合などに適している。

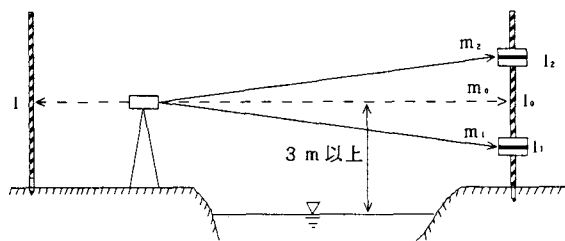


図-2 俯仰ねじ法

観測距離と測量方式は、長距離の観測に用いる器械を短い区間に適用できるので観測点の状況を勘案して判断するべきである。

2.3 ウィルドN3とウィルドT3の観測精度

俯仰ねじ法に使用される主な器械としてウィルドN3, トランシット法に使用される主な器械としてウィル

ドT3が上げられる。

N3は、対岸の目標板を俯仰ねじを回してその目盛りを観測 (分画の読定) し高さを求める。T3は、高度角を観測して、別の方法で求めた距離から相手の高さを算出する。T3が最小0.1秒単位で測定できることはよく知られているが、N3の最小読定単位である0.1分画が何秒になるかはあまり知られていない。次表にそれを示す。

表-2 N3とT3の比較

	最小測定	気泡感度/2mm	視準ヶ所
N3	0.206秒	10秒 (主気泡管)	3ヶ所
T3	0.1 秒	12秒(高度角気泡管)	1ヶ所

3. 観測回数

渡海水準測量と一般の直接水準測量を同列で考えるのは適当とは言えない。このことは、例えば、20" 読みのトランシットを用いて観測回数を重ねれば1" 読みのトランシットと同程度の精度が得られるか? と似ている。これは、見かけ上得られたとしても1観測に含まれる誤差は、実際は小さくはならないからである。

すでに述べたように、屈折率に大きく起因する渡海水準測量の誤差は、観測距離が長くなることを考えれば、ただ単に連続的に観測回数を増やすことなく、日数を重ねて (屈折係数の異なる日々を取り込んで) 実施することが望ましい。

観測回数については、観測値を次々と計算して、これらの値を逐次平均し、一定の値に収れんする状況来判断して、観測回数を決める方法が望ましいと考える。しかし、観測回数については、ある程度の目安を設けることが観測計画を立てる上でも必要である。

このため、ここでは渡海水準測量における誤差を推定、あるいは再計算して、直接水準測量の精度と比較する方法により、渡海水準測量の観測回数について考察する。

4. トランシット4台による観測回数の目安

4.1 比高差 (h) の誤差 (dh) の推定

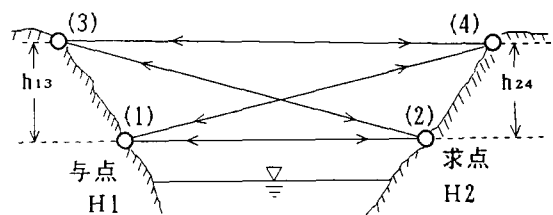


図-3 トランシット4台法概念図

トランシットによって比高差 (h) を求める計算式として、斜距離を使用する場合は次式による。

$$h = L \cdot \sin \alpha \quad (4-1)$$

ただし、L：斜距離 α ：高度角

(4-1) 式を微分して

$$dh_1 = \sin \alpha \cdot dL + L \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \quad (4-2)$$

α は、小さいと考えて $\cos \alpha = 1$ とすると、

$$dh_1 = \sin \alpha \cdot dL + L \cdot d\alpha \quad (4-3)$$

これとは別に、気差による影響を考慮して、

$$dh_2 = dk \cdot L^2 / 2R \quad (4-4)$$

誤差伝播から、

$$dh = \sqrt{(\sin \alpha \cdot dL + L \cdot d\alpha)^2 + (dk \cdot L^2 / 2R)^2} \quad (4-5)$$

(4-5) 式は、1 測点の上下 2 目標の高度角観測から推定される誤差とすると、観測点が 4 点で各 2 方向の場合の dh は、次式となる。

$$dh_0 = dh / \sqrt{8} \quad (4-6)$$

4.2 誤差量の推定

高度角 α は、観測距離が長くなることから 1° を越えることはない。豊予海峡の場合、観測斜距離が最大 14.8 km で最大高度角 $\leq 0^\circ 21'$ であった。

このことから、 $\alpha = 1^\circ$ を想定する。

距離の誤差は、10cm として計算する。

高度角の誤差 ($d\alpha$) は、豊予海峡の観測データから 1 測点における上下 2 目標の高度角定数差の標準偏差 (以下 SD とする) が $1.4''$ (高度角定数制限 $5''$ を越えて計算に使用していないデータも含む) と、トランシットの高度角定誤差 $0.8''$ (後述 (5)-①の項) を加えた $2.2''$ として計算に使用する。

気差の影響による誤差の主要因である屈折係数の誤差 (dk) も、豊予海峡のデータから平均屈折係数 0.160001 の $SD = 0.0063$ を使用する。

ちなみに、屈折係数： k は、次表のような結果が得られている。

また、紀淡海峡では、 $d\alpha = 1.2''$ 、 $dk = 0.0081$ を得た。

表-3 屈折係数： k の算出結果

地 方	観測年月	セット数	対回数	k (平均値)
津軽海峡	70. 9-10	114	6	0.159
"	71. 9-10	114	6	0.165
東京湾	72. 9	73	5	0.153
豊予海峡	91.11-12	268	2	0.160
紀淡海峡	95.11-12	420	2	0.116

豊予、紀淡海峡以外は「測地資料第 6 巻」 「鉛直角観測における屈折係数について」 1979 年 井上員男報告による。なお、観測距離は、津軽海峡約 22.5km、東京湾約 6.5km、豊予海峡 14.7km、紀淡海峡約 10.8km である。

ここまですを整理すると次のようになる。

$$\sin \alpha \cdot dL = \sin 1^\circ \times 10\text{cm} = \text{約 } 2\text{ mm}$$

$$L \cdot d\alpha = L \cdot 2.2'' / \rho''$$

$$dk \cdot L^2 / 2R = 0.0063 \cdot L^2 / 2R \quad R = 6370\text{km}$$

二等水準測量 (以下二等とする) の $d\alpha$ は、 $3.1''$ とする。これは次の考え方による。

特級トランシットでは、観測値の SD とトランシットの定誤差の仮定値 $0.8''$ を加えた $2.2''$ としている。

高度角定数の制限 $5''$ を 3σ とした場合の σ は $1.667''$ で $\chi\sigma = 2.2''$ とすると、係数 (χ) は 1.32 となる。

1 級トランシットによる高度角観測の定数制限を $7'' = 3\sigma$ とすると、

$$d\alpha = 1.32 \cdot \sigma = 3.1'' \text{ が得られる。}$$

4.3 観測回数

重量： P と平均二乗誤差： M の関係は、次式で表される。

$$P_1 : P_2 = \frac{1}{M_1^2} : \frac{1}{M_2^2}$$

ここで $M_1 = dh_0$ 、 $M_2 = A$ として、 P_1 と P_2 を等しくするための n を観測回数として求める。

ただし、 $M_2 = A$ は、一等水準測量の観測の往復差の制限である $2.5\sqrt{S}$ として、これを 3σ と考え σ を A に設定する。 $\sigma = 2.5\sqrt{S} / 3$ より $A = 0.8\sqrt{S}$ (S ：は km 単位) とする。

二等の場合は、 $3\sigma = 5.0\sqrt{S}$ より $A = 1.7\sqrt{S}$ (S ：は km 単位) とする。

$$n = \frac{M_1^2}{M_2^2}$$

としてセット数： n を算出する。

計算結果は表-4 に示す。

なお、セットの考え方は、1 測点あたりの上下 2 目標の観測 (1 対回) が 4 点同時に行われたものを 1 セットとする。

これにより観測セット数 n を距離の指数関数 $n = L^a + b$ で表わせるものとして、最小二乗法により a 、 b を決めると次のとおりとなる。

セット数 (n) の算出

$$\text{一等 } n = L^{2.2} + 110 \quad \text{二等 } n = L^{1.9} + 30$$

ただし、 L ：km 単位

表-4 と表に付随するグラフから分かるように一等水準測量の場合は観測距離 10~15km 付近が、二等水準測量の場合は 5~12km 付近が最適となっている。

セット数 (n) について現「水準測量作業規程 (案)」では、一等の場合 $n = L^{2.3} + 80$ となっている。両者を検討し今後の作業規程作成の参考にしたい。

4.4 観測日数

1 セットの観測に要する時間を 5 分以内、セット間隔を 5 分以上として、観測時間帯を 13 時を対称とした 10~16 時の 6 時間とすると、最多観測で 40 セット程度と考え

られる。この中には、高度角の定数が制限を越える観測も数回はあるであろうし、また、6時間の連続観測を10日以上にわたって続けることを考慮すると、1日のセット数は25セット位が適当と考える。事実、豊予海峡('91年)の場合では、四国側から九州側を観測するのに、夕日が海に反射して高度角定数の制限を超えるセットが何度かあった。気象を考慮するならば、観測途中で天候が変化し測定できなくなることもある。このような日の観測は、同時観測といえども採用値には加えないようにするべきである。つまり、1日の観測セット数が10セットに満たないものは採用しない。

これらのことを考慮して、日数計算に用いる1日の標準セット数を25とする。また、二等の場合は、1秒単位の観測なので少し多めに1日30セットとする。

日数 (Day) の算出

一等 $D=n/25$ 二等 $D=n/30$

4.5 観測上の注意点

① 4点法では、特級トランシットを使用して高度角を測定するが、紀淡海峡の渡海水準測量でウィルドT3には、高度角に定誤差(図-4参照)を持つものがあることが発見された(このトランシットはライカ本社に空輸、調査されたが原因を特定することはできなかった)。

トランシット個々の定誤差を器械ごとに抽出し、その定誤差を決定することは難しい。したがって、コリメーターを使用して個々の器械の高度角定数差をよく把握し、高度角が著しく異なる器械は省くべきである。

コリメーターを使用して検定しても4台の内1台が他の器械と3秒程度異なった結果を出すと仮定した場合、計算結果に表れる誤差は $3''/4 \approx 0.8''$ となる。この仮定値を(2)各誤差の推定の項の $d\alpha$ に入れている。

また、実際の観測では、4台のトランシットをセット数上均等になるよう観測点をローテーションさせて、トランシットの定誤差を消去出来るように観測計画を立てる必要がある。

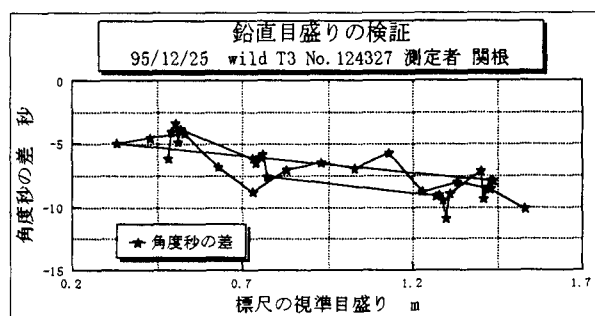


図-4 ウィルドT3の高角度の定誤差
測定場所：国土地理院検定棟

注) テスト内容 約100m離れた標尺の1cm刻みの目

盛を測定。あらかじめウィルドN3を使用してT3の高角度 $0^{\circ}0'0''$ にあたる位置(標尺目盛)を確定(球差は計算してある)して測定した。

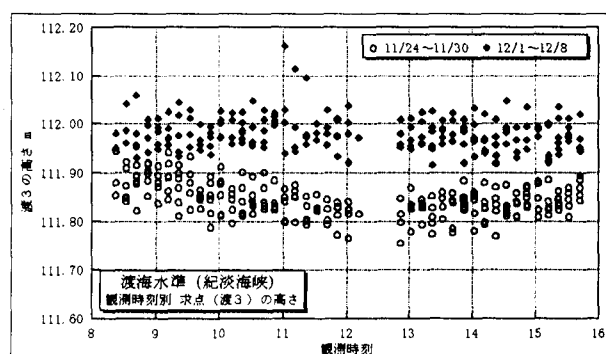


図-5 紀淡海峡求点(渡3)の観測時刻別高さ

図-5は全セットのほぼ中間(11月と12月)でトランシットを交換した際に発見された定誤差の違いによる渡(3)の高さの変化であり、その結果は次のようになる。

11/24~30 平均値=111.8434m $\pm$ 35.5mm

12/1~8 平均値=111.9800m $\pm$ 35.3mm

全 体 平均値=111.9117m $\pm$ 76.9mm

また、図から特にばらつきが大きい時間帯は見られず、午前と午後の対称性も明確ではない。このことは、短時間の同時観測が好結果を得ていると言える。(観測時刻と精度については後述する)

② 日中10km以上先の回光灯の光を望遠鏡の十字線で捕捉するのは、ある程度の熟練を要する。回光灯のバックを黒くして視準しやすいようにするなどの工夫も必要になる。

③ 観測する方向によっては、日没間際で太陽光が海面に反射して視準しにくい場合も考えられるので、観測時期の計画も精度を確保するためには選点と同様に重要な注意点である。

④ 渡海水準点間の距離がおおよそ10kmを越えるトランシット4台による方法は、自岸、対岸とも上下に高低差が約50m以上異なる2点の観測点を設けることになっている。これは、光路の曲率が高さの連続関数と仮定して高さの違いによる屈折の変化を補正するために用いられている。

観測距離と測量方式の項でも述べたように、高低差50m以上にこだわりすぎて最良の観測点を選点できないおそれもある。最優先すべきは陸地部分の視準線通過を極力少なくすることである。

5. トランシット2台による観測回数を目安

これは、図-3の与点(1)、求点(2)だけの場合である。

4点法と同様の計算を行うが観測点が2点のため高低差(h)の誤差(dh_0)は、次式を用いる。

$$dh_0 = dh / \sqrt{2}$$

5.1 各誤差量の推定

すでにトランシット4台の項で述べたように各誤差を見積もると、

$$\sin \alpha \cdot dS = \sin 1^\circ \times 10\text{cm} = \text{約 } 2\text{ mm}$$

$$L \cdot d\alpha = L \cdot 2.2'' / \rho'' \quad \text{二等 } d\alpha = 3.1''$$

$$dk \cdot L^2 / 2R = 0.0063 \cdot L^2 / 2R \quad R = 6370\text{km}$$

$d\alpha$ については、4点法と同様に一等で $2.2''$ 、二等で $3.1''$ とする。また、 dk も同様に、 $dk = 0.0063$ とする。

5.2 観測回数

トランシット4点法で述べたように、一等水準測量の観測の往復差の制限 $2.5\sqrt{S}$ として、これを 3σ と考え σ をAに設定する。 $\sigma = 2.5\sqrt{S} / 3$ より $A = 0.8\sqrt{S}$ (S: はkm単位)とする。

二等の場合は、 $3\sigma = 5.0\sqrt{S}$ より $A = 1.7\sqrt{S}$ (S: はkm単位)とする。

日数とセット数は、

$$\text{一等} \quad \text{セット数: } n_1 = 50 \cdot S \quad S: \text{km単位}$$

$$\text{日数: } D_1 = n / 30$$

$$\text{二等} \quad \text{セット数: } n_2 = 20 \cdot S \quad S: \text{km単位}$$

$$\text{日数: } D_2 = n / 30$$

ただし、1セットは自岸、対岸で目標を同時に2対回観測したものを指す。

以上により計算した日数、セット数を別表5-1に示す。

6. 俯仰ねじ法による観測

俯仰ねじ法のうち、気泡管レベルを4台使用する測量方式は、2台のレベルをできるだけ同じ高さに整準ねじで調整し、ピントをそれぞれ対岸の目標に合わせた後、写真-1のようにお互いの対物レンズを対向させ、一方の望遠鏡の十字線の像が、もう一方の十字線に一致するように対物レンズ前面の楔形レンズを調整してから本観測を始める。

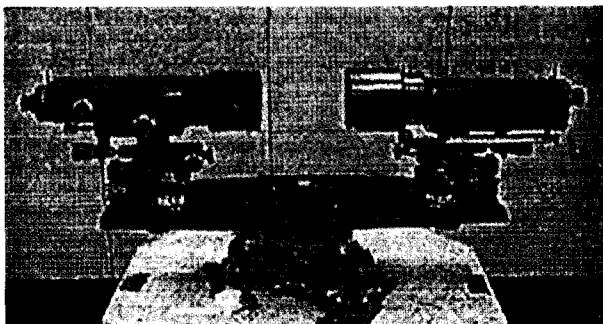


写真-1 楔形レンズの調整 (ウィルドN3)

6.1 俯仰ねじの回転数による観測

俯仰ねじ法は、俯仰ねじ(以下チルチングスクリュー

という)を回すことによって視準線を傾斜させて、定められた間隔で上下に設置された目標板と、主気泡管が水平な状態の3つの読み値で高さを求める方法である。

ウィルドN3のチルチングスクリューには、50目盛(以下分画という)が付いており1回転させると $0.50\text{mm} / 1\text{m}$ 、または $103.1''$ だけ視準線の傾斜を変化させる。したがって、1分画は、 $0.01\text{mm} / 1\text{m}$ または $2.06''$ に相当する。

すでに述べたように観測に当たっては、0.1分画単位で読定する。

ちなみに、分画の測定精度は $0.5''$ であるから0.25分画に相当する。観測に先立って分画の点検も必要である。

一般的な観測では、3mの標尺に目標板を設置する。この場合、 m_0 の読み値に相当する l_0 の位置から ± 50 分画の位置に上下の目標板を設定している。したがって、2kmの渡海水準点間で、50分画ずつ間隔をとりたいならば0.5mと2.5mの位置を目安に目標板を設置することになる。

6.2 観測誤差の検証

別表-7は、観測手簿から再計算した4台法と2台法のサンプルである。

各読定分画の較差から、下方目標板(l_1)の読み値(m_1)、主気泡管を水平にしたときの読み値(m_0)及び上方目標板(l_2)の読み値(m_2)の、標準偏差(SD)を載せている。4台法では、1測点2台のうち1対回の較差の大きい数値を計算の対象とした。

4台法、2台法とも各分画のSDは、おおむね m_1 、 m_0 、 m_2 の順で小さくなっている。これは、1対回の観測順序による並びである。観測は、 $m_1 \rightarrow m_0 \rightarrow m_2 \rightarrow m_2 \rightarrow m_0 \rightarrow m_1$ の順番で行われている。どの分画もおおむね0.5分画程度以内の精度で観測されている。

0.5分画は約1秒であり、直接水準測量では $0.2\text{mm} / 40\text{m}$ に相当する。

現行では、5対回が1/2セットということもあり、分画較差による許容範囲(制限)は設けていない。サンプルを見る限り0.5分画の3倍にあたる1.5分画を1対回の制限とみてよいといえる。

表-7のグラフ(上グラフ)で、データEとデータFは、分画誤差と屈折誤差から導いた線分である。分画誤差を0.5(約1秒)、屈折誤差はトランシット法と同じ $dk = 0.0063$ を用いている。片岸にレベル2台を使用する4台法(データF)は、実測値のSDから得た回帰直線によく近似しているのがわかる。このことは、2台のレベルがよく調整(2台のレベルの十字線の一致)されており、2台の平均視準線は両岸のレベルとも水平を得ているといえる。

したがって、他の方法のように途中で器械を交換しなくてもよいという結果である。換えるとすれば観測者を中間で交換して、観測者の個人誤差を消去するべきで

ある。また、2台法（データE）は、 $(0.5^2 + 0.5^2)^{1/2}$ によって係数を0.707として計算した。こちらは近似しているとは言い難い。器械交換時に視準線が変化してしまったのかもしれないが、サンプルからみて鳴門海峡と2つの周防灘のSDが大きすぎるのも事実である。

6.3 観測時刻と測定精度

紀淡海峡の時刻別高さ（図-5）でもわかるように同時観測を短時間で行えば、午前と午後の組み合わせによるセットの考え方でなくてよいことは、表6-1の必要な観測セット数（10対回を1セットと1対回を1セット）の欄からもいえる。10対回を1セットとした場合のSDは、1対回1セットに比べてSDは小さいが、必要な観測対回数でみると明らかに多く、特に距離が長いとその差は著しい。

観測時間帯では、グラフ6-1の4つのサンプルからみても同時観測の有効性が示されてる。

したがって、今後は俯仰ねじ法も同時観測1対回を1セットとする方式に変えるべきである。

7. 俯仰ねじ法による観測回数の目安

表-7の対回数の比較グラフの2つの回帰直線式はそのまま必要な対回数（セット数）を表している。ただし、このままでは短い距離でのセット数が少なくなりすぎることと安全率を考慮し、回帰式のY切片の項を取り除いた次式をセット数の目安としたい。

$$2 \text{ 台でのセット数 } n_2 = 185 \cdot S$$

$$4 \text{ 台でのセット数 } n_4 = 63 \cdot S$$

観測時間帯は9時から17時とし、一日のセット数は2台法では40～80セット、4台法では30～60セット程度を目安とする。

$$\text{日数はそれぞれ } D_2 = n_2 / 70$$

$$D_4 = n_4 / 50$$

また、2台法の1セットに要する時間は、3分程度以内、セット間隔は2分以上を目安とする。

4台法では、1セットを5分以内、間隔は2分以上を目安とする。

8. 気泡管レベル1台による交互法

交互法（5m法）は、水平視準のみで高さを求めるため、チルチングスクリュー機構のない自動レベルも使用できる方法である。この方法は、一等水準測量で300mまでの短い距離に利用されている。交互法はその適用例が少ないこともあって分析を行っていない。

通常、1台のレベルで観測されるが、自動レベル2台を使用して同時観測するならば、観測精度が向上するはずであり、適用距離も多少長く取れるであろうと考える。

これとは別に、チルチングスクリューのレベル1台で交互法を行っても現行の300mより長めの適用距離が見込まれる。グラフ6-1の下の方の2つのグラフは、2台の

同時観測であるが1台ずつに分離したデータもグラフ化したものである。観測年月は異なるが、ほぼ同じ場所で、同じレベルを使用している。13時を対称に器械を交換して観測されているが、2つのデータとも±5mm程度の較差であり、良好な結果といえる。

同じ器械であるが92年は、視準線の調整がきっちりできていないためか対岸に移動後との較差は大きい。しかし、その平均は同時観測の平均値とほとんど同じになる。

また、2つのデータとも器械の移動中に視準線の変化は見られない。

この方法についての精度、必要セット数等については今後検討する予定である。

9. その他の方法

俯仰ねじ法に、主に使用されていたウイルドN3は、96年8月で製造中止となっており、今後チルチングスクリューの付いたレベルを求めるならば国産品となる。いずれにしても渡海水準測量のためにだけレベルを購入するわけにはいかないとすれば、他のレベルやトランシット等を使用する方法を模索しなければならない。

したがって、例えば自動レベル4台法も検討の材料となる。

また、電子レベルもその対象と考えてよい。ライカ社の電子レベルはピントと距離計が連動しているため100m以上の測定は不可能だが、ツアイス社のレベルは30cmの区間が連続して見れば計測可能なので、バーコード尺を拡大コピーして用いるならば500m程度は測定できるはずである。この分野は今のところ全く手が着けられていない状況にある。

10. 紀淡海峡でのGPSとの比較

紀淡海峡の渡海水準測量では、渡海点間の距離をGPS測量で求めたため、この間の楕円体高差もでている。最新のジオイド高（日本のジオイド96（仮称））データを使用して高低差に直したものを下表に示す。

表-6 渡海水準とGPSの高低差（m）の比較

区間	渡海①	GPS②	③	④=②-③	差①-④
2-3	-6.569	-6.803	-0.267	-6.536	-0.033
2-4	-90.963	-91.205	-0.266	-90.939	-0.024
1-3	64.161	63.942	-0.255	64.197	-0.036
1-4	-20.234	-20.458	-0.254	-20.204	-0.030

注）表中、②：GPSによる楕円体高差、③：ジオイド96によるジオイド高差、④：GPSによる高低差

GPS測量結果からも、ジオイド96のデータを使用すれば数cmの精度で高低差を求めることが検証できた。

今後GPSがさらに高精度となれば、こうした場所での変動量検出にも期待できる。

表-4 トランシット4台法の必要観測セット数と日数

一等水準の場合

距離 S Km	$L \cdot d\alpha$ mm	$L^2 \cdot dk/2r$ mm	dh mm	A mm	計算観測回数 n	セット	n/25 日数	$S^2 \cdot 2.2+110$ セット	2n 対回数
5.0	53.33	12.36	19.37	1.79	117.2	118	6	144	289
6.0	64.00	17.80	23.50	1.96	143.8	144	7	162	323
7.0	74.66	24.23	27.76	2.12	172.0	173	8	182	365
8.0	85.33	31.65	32.18	2.26	202.3	203	9	207	414
9.0	95.99	40.05	36.78	2.40	234.9	235	10	236	471
10.0	106.66	49.45	41.57	2.53	270.0	271	11	268	537
11.0	117.32	59.84	46.57	2.65	308.0	309	13	305	611
12.0	127.99	71.21	51.79	2.77	349.2	350	14	347	693
13.0	138.66	83.57	57.24	2.88	393.8	394	16	392	785
14.0	149.32	96.92	62.94	2.99	442.2	443	18	442	885
15.0	159.99	111.26	68.90	3.10	494.5	495	20	497	993
16.0	170.65	126.59	75.13	3.20	551.2	552	23	556	1111
17.0	181.32	142.91	81.63	3.30	612.4	613	25	619	1239
18.0	191.99	160.22	88.41	3.39	678.5	679	28	688	1375
19.0	202.65	178.52	95.49	3.49	749.8	750	31	761	1521
20.0	213.32	197.80	102.86	3.58	826.5	827	34	838	1676
21.0	223.98	218.08	110.53	3.67	908.9	909	37	921	1841
22.0	234.65	239.34	118.51	3.75	997.4	998	41	1008	2016

km

10.8 紀淡海峡

SD= 76.92

14.7 豊予海峡

SD= 52.71

二等水準の場合

S km	$L \cdot d\alpha$ mm	$L^2 \cdot dk/2r$ mm	dh mm	A mm	計算観測回数 n	セット	n/30 日数	$S^2 \cdot 1.9+30$ セット	2n 対回数
5.0	75.15	12.36	26.93	3.80	50.2	51	2	51	103
7.0	105.20	24.23	38.18	4.50	72.0	73	3	70	141
9.0	135.26	40.05	49.88	5.10	95.7	96	4	95	190
10.0	150.29	49.45	55.94	5.38	108.3	109	4	109	219
11.0	165.32	59.84	62.16	5.64	121.6	122	5	125	250
13.0	195.38	83.57	75.13	6.13	150.3	151	6	161	322
15.0	225.44	111.26	88.89	6.58	182.3	183	7	202	403
17.0	255.50	142.91	103.51	7.01	218.1	219	9	248	495
19.0	285.55	178.52	119.07	7.41	258.2	259	10	299	598
21.0	315.61	218.08	135.63	7.79	303.1	304	12	355	710

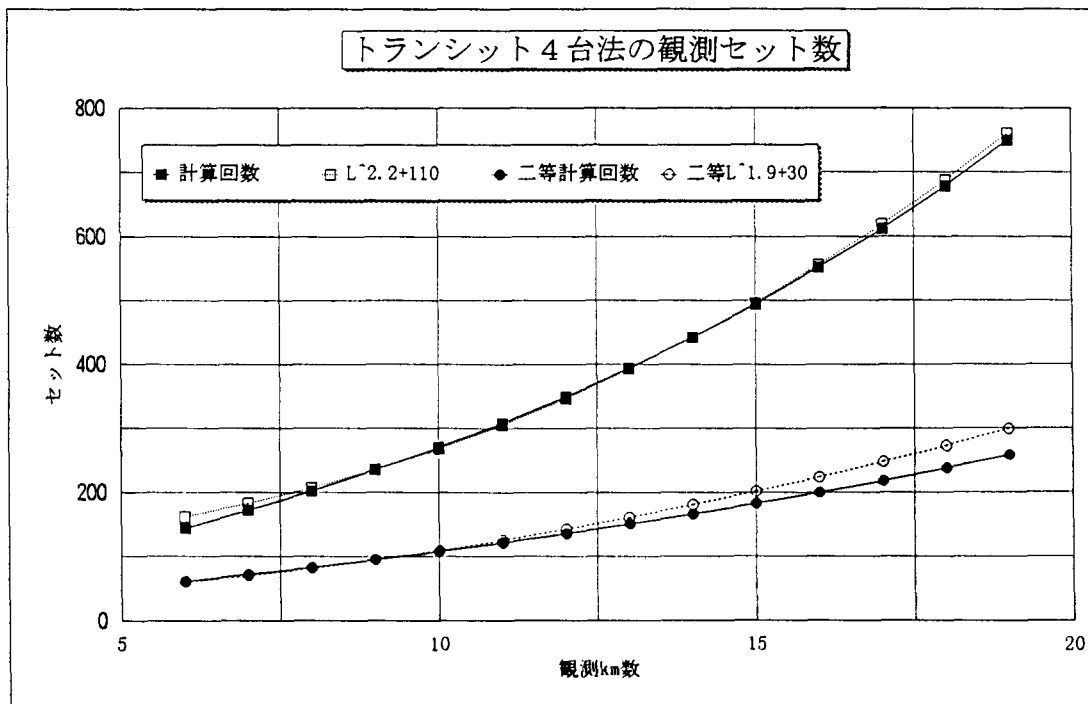
 注) $\sin \alpha \cdot dS$ は一等、二等ともdhの項に加えてある。


表-5 トランシット2台法の必要セット数と日数

一等水準測量の場合

距離 S Km	$s \cdot d\alpha$ mm	$s^2 \cdot dk/2r$ mm	dh mm	A mm	計算観測回数		n/30 日数	50・S セット	2n 対回数
					n	セット			
1.0	10.6659	0.4945	7.68	0.80	92.2	47	2	50	100
2.0	21.3318	1.9780	15.21	1.13	180.8	91	4	100	200
3.0	31.9977	4.4505	22.89	1.39	272.8	137	5	150	300
4.0	42.6636	7.9121	30.71	1.60	368.5	185	7	200	400
5.0	53.3295	12.3626	38.74	1.79	468.9	235	9	250	500
6.0	63.9953	17.8022	46.99	1.96	575.0	288	10	300	600
7.0	74.6612	24.2308	55.52	2.12	688.1	345	12	350	700
8.0	85.3271	31.6484	64.37	2.26	809.2	405	14	400	800
9.0	95.9930	40.0549	73.56	2.40	939.5	470	15	450	900
10.0	106.6589	49.4505	83.14	2.53	1080.1	541	17	500	1000
11.0	117.3248	59.8352	93.14	2.65	1232.2	617	19	550	1100

km mm

1.09 明石海峡 SD= 6.79

1.13 明石海峡 SD= 3.75

1.96 明石海峡 SD= 4.16

二等水準測量の場合

S Km	$s \cdot d\alpha$ mm	$s^2 \cdot dk/2r$ mm	dh mm	A mm	計算観測回数		n/30 日数	20・S セット	2n 対回数
					n	セット			
1.0	15.0292	0.4945	10.73	1.70	39.8	20	1	20	40
2.0	30.0584	1.9780	21.35	2.40	78.8	40	2	40	80
3.0	45.0876	4.4505	32.07	2.94	118.6	60	2	60	120
4.0	60.1168	7.9121	42.90	3.40	159.2	80	3	80	160
5.0	75.1460	12.3626	53.87	3.80	200.8	101	4	100	200
6.0	90.1753	17.8022	65.01	4.16	243.7	122	4	120	240
7.0	105.2045	24.2308	76.35	4.50	288.2	145	5	140	280
8.0	120.2337	31.6484	87.93	4.81	334.4	168	6	160	320
9.0	135.2629	40.0549	99.76	5.10	382.6	192	6	180	360
10.0	150.2921	49.4505	111.89	5.38	433.2	217	7	200	400
11.0	165.3213	59.8352	124.33	5.64	486.2	244	8	220	440

注) $\sin \alpha \cdot dS$ は一等、二等とも dh の項に加えてある。

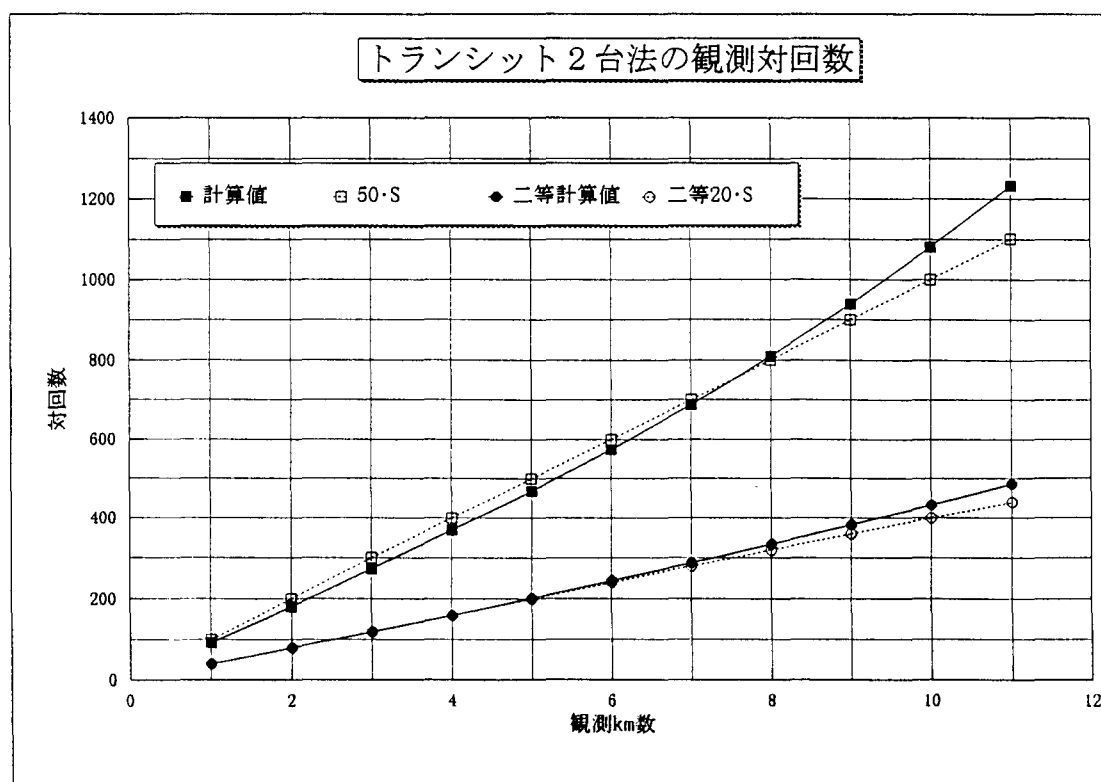


表-7 俯仰ねじ法1対回の測定精度

渡海水準測量 俯仰ねじ法 (Level 4台)

観測 年 月	測 場 所	観測 距離 km	直接水準 での制限 A=	観測 日 数	採用値 (5対回*2) 10対回を1set				1set当 たりの SD=B	n= B ² /A ² 必要な観測 セット数*10	日 間 SD	1対回値 1対回を1set	1set当 たりの SD=C	n= C ² /A ² 必要な観測 セット数	各読定分面の較差の 標準偏差				分面が 及ぼす 影響	
			1/3(mm)	対回数	set数	高低差 m	m	セット数	対回数	set数	高低差 m	m	セット数	m1	m0	m2	平均	m		
70/09	バンガラ	0.4	0.527	1								20	1.3	6.1						
	バンガラ	0.8	0.745	2							20	8.1	118.1							
	バンガラ	0.8	0.745	1							20	5.5	54.5							
	バンガラ	1.1	0.874	2							30	6.0	47.1							
	芸予海峡	1.35	0.968	2	120	12	0.0143	3.57	135.9	2.51	48	48	0.0143	5.93	37.6	0.41	0.50	0.32	0.41	5.54
70/09	バンガラ	1.7	1.087	3							40	7.7	50.2							
	バンガラ	1.8	1.118	3							40	7.5	45.0							
	芸予海峡	2.15	1.222	4	220	22	-0.3074	5.2	181.1	3.68	108	108	-0.3068	7.08	33.5	0.40	0.45	0.33	0.39	8.46
	バンガラ	3.0	1.443	8							100	18.2	159.0							
	96/02	周防灘	3.0	1.443	10	330	33	0.6161	13.9	927.4	12.64	132	132	0.6104	24.23	281.7	0.52	0.54	0.35	0.47

注) *観測場所のバンガラは、バンガディッシュ国を表す。

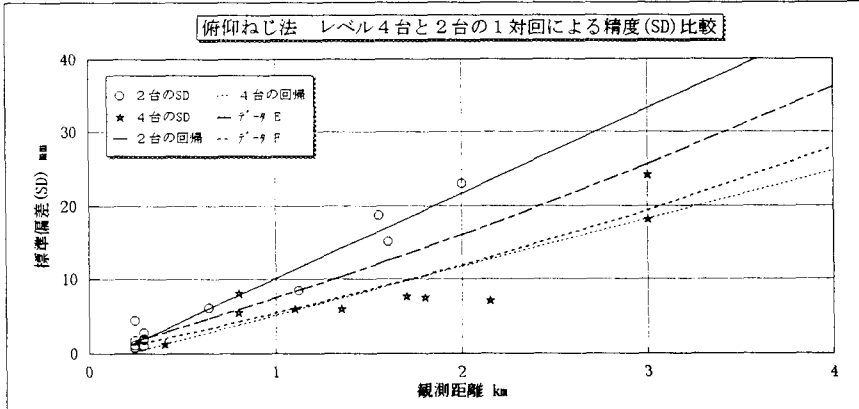
*4台法、2台法とも、1対回の計算は5対回中の1番目と5番目を抽出した。また、午後天候が悪化したため中止となった不採用のセットも再計算の対象とした。

通常の1対回の対回数は、採用値(10対回)の対回数の2/5回である。

*各読定分面の較差は、4台法の場合、1測点2台の1対回のうち較差の大きい数値を使用した。

渡海水準測量 俯仰ねじ法 (Level 2台)

観測 年 月	観測 場 所	観測 距離 km	直接水準 での制限 A= 1/3(mm)	観測 日 数	採用値 (5対回*2) 10対回を1set			1set当 たりの SD=B	n= B ² /A ² 必要な観測 セット数*10	日 間 SD	1対回値 1対回を1set			1set当 たりの SD=C	n= C ² /A ² 必要な観測 セット数	各読定分面の較差の 標準偏差				分面が 及ぼす 影響
					対回数	set数	高低差 m				対回数	set数	高低差 m			m1	m0	m2	平均	
91/10	大阪港	0.24	0.408	1	80	8	-0.0125	0.44	11.7		32	32	-0.0126	4.44	118.2	0.34	0.41	0.22	0.32	0.78
92/10	大阪港	0.24	0.408	1	80	8	-0.0126	0.43	11.0		32	32	-0.0127	0.77	3.6	0.40	0.42	0.22	0.35	0.83
93/10	大阪港	0.24	0.408	1	80	8	-0.0102	0.34	7.0		32	32	-0.0102	1.08	7.1	0.30	0.30	0.16	0.25	0.61
94/10	大阪港	0.24	0.408	1	80	8	-0.0101	0.35	7.1		32	32	-0.0104	1.79	19.1	0.20	0.26	0.12	0.19	0.46
95/02	大阪港	0.24	0.408	1	80	8	-0.0071	0.56	19.1		32	32	-0.0073	0.70	3.0	0.29	0.28	0.09	0.21	0.51
91/10	大阪港	0.29	0.449	1	80	8	-0.9682	0.44	9.7		32	32	-0.9681	2.80	38.8	0.22	0.26	0.21	0.23	0.67
92/10	大阪港	0.29	0.449	1	80	8	-0.9531	0.16	1.2		32	32	-0.9527	1.04	5.3	0.34	0.26	0.25	0.28	0.82
93/10	大阪港	0.29	0.449	1	80	8	-0.9544	0.40	8.0		32	32	-0.9529	1.83	16.7	0.27	0.57	0.24	0.36	1.04
94/10	大阪港	0.29	0.449	1	80	8	-0.9561	0.33	5.4		32	32	-0.9568	1.80	16.1	0.30	0.28	0.27	0.28	0.82
95/02	大阪港	0.29	0.449	1	80	8	-0.9544	0.46	10.5		32	32	-0.9546	2.02	20.3	0.27	0.32	0.16	0.25	0.73
89/03	大阪港	0.64	0.667	1	40	4	0.2271	2.72	165.9		16	16	0.2265	6.13	84.5					
90/11	明石海峡	1.12	0.882	2	80	8	0.3194	3.69	175.1	2.60	32	32	0.3194	8.45	91.8	0.47	0.46	0.32	0.42	4.67
95/03	鳴門海峡	1.55	1.037	4	160	16	-0.0694	15.53	2240.6	18.45	80	80	-0.0706	18.74	326.2	0.36	0.34	0.24	0.31	4.86
96/01	周防灘	1.6	1.054	10	180	18	0.2286	6.60	392.0	8.09	71	71	0.2271	15.16	206.8	0.64	0.46	0.28	0.46	7.36
96/02	周防灘	2.0	1.179	8	200	20	-0.4053	11.30	919.4	11.26	80	80	-0.4035	23.09	384.0	0.57	0.32	0.33	0.41	8.13



$$2 \text{ 台の直線回帰} = 11.536 \cdot S - 1.363$$

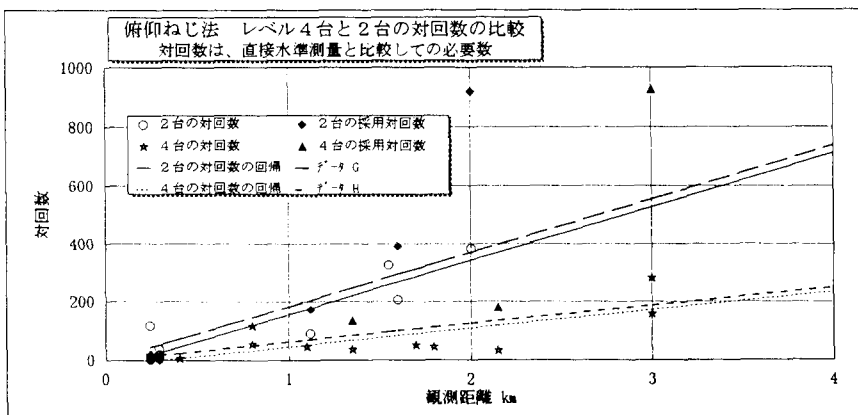
$$4 \text{ 台の直線回帰} = 6.533 \cdot S - 1.365$$

$$\text{データ E} = 0.707 \text{ 分面誤差} + \text{気差の誤差}$$

気差誤差の係数は、0.0063

$$\text{データ F} = 0.5 \text{ 分面誤差} + \text{気差の誤差}$$

気差誤差の係数は、0.0063



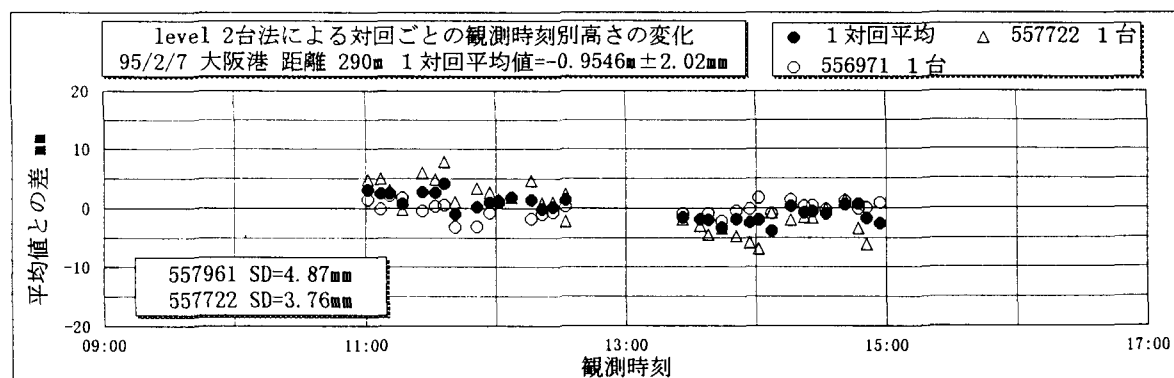
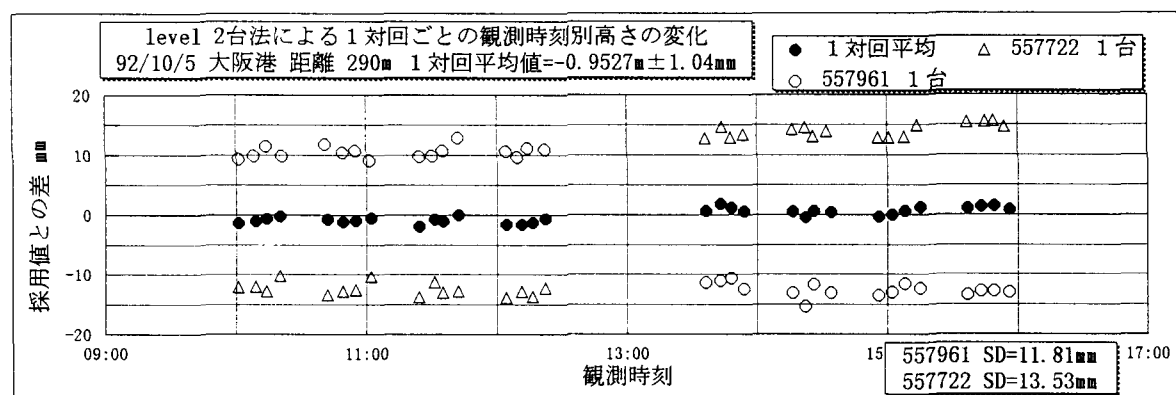
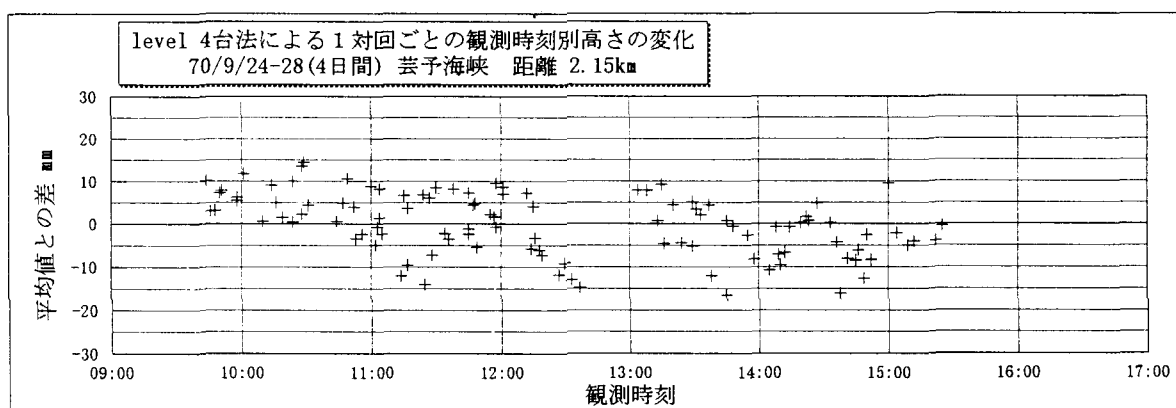
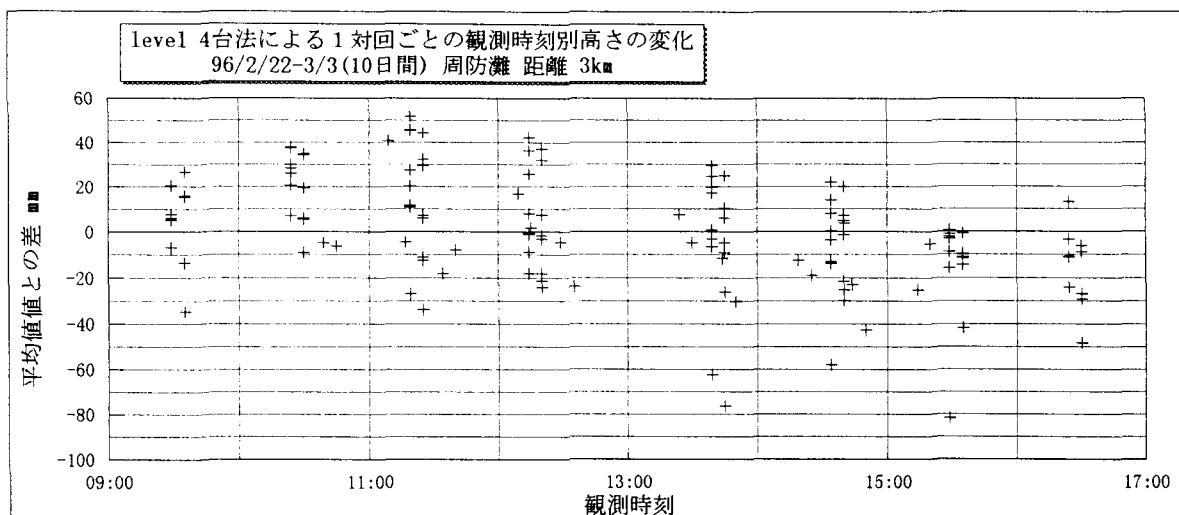
$$2 \text{ 台の直線回帰} = 185.188 \cdot S - 28.604$$

$$4 \text{ 台の直線回帰} = 63.363 \cdot S - 18.738$$

$$2 \text{ 台のセット数目安} = 185 \cdot S : \text{データ G}$$

$$4 \text{ 台のセット数目安} = 63 \cdot S : \text{データ H}$$

グラフ 6-1



おわりに

渡海水準測量で、特に長距離の場合は実施例が少ない。長距離では、主要な誤差要因である大気中の屈折に対して特に注意が必要であり、観測は、日中観測のみに偏らず、特に観測初期の段階では、早朝、日中、夕刻、夜間等の各時間帯別の観測を行い、その観測地域の屈折状況を検討してから本観測に入るのも1つの方法である。

本稿では日間較差や観測の季節について触れていない。日間較差についてみれば1観測のSDより、こちら

のSDの方がはるかに大きい。距離が短くともできれば複数日の観測を実施したい。季節については検討材料がほとんどない。また、水準面の曲率は鉛直線偏差の関数であるから重力異常分布からの推定も行うべきである。

俯仰ねじ法で扱ったのは、ほんの数例のサンプルであってこの数値だけで観測セット数や日数を算出するべきではないかもしれないが、これを参考にさらに検討を加えるべきと考える。

参 考 文 献

- 俯仰ねじ法における観測回数について 木内秀夫 国土地理院技術資料B. 5-No. 8 1982年3月
 鉛直角観測における屈折係数(K)について 井上員男 測地資料第6巻 1979年10月
 経緯儀法渡海水準測量の光路屈折について 菅野静男 他 測地資料第6巻 1979年10月
 4点同時の経緯儀法による渡海水準測量 高野良仁 他 国土地理院時報 76 1992年
 津軽海峡渡海水準測量に及ぼす大気の影響 大野欽一 測地学会誌第2巻 第3-4号 1956年
 測地学 Bomford