

# 渡海測量を経験して

荒木 春視\*  
長嶋 敏正\*\*

## 1. 緒言

昭和58年1月27日に青函トンネル先進導坑が青森側から23.900 km、北海道側から29.950 km離れた津軽海峡の海底下100 m地点で貫通した。

昭和45年4月に日本鉄道建設公団から委託を受けてから足かけ12年10カ月に亘り、渡海測量を手がけてきた朝日航洋(株)にとって世紀のプロジェクトを推進する一翼を担い得た光栄と、無事貫通されることができた安堵感にひたることができた。

この12年10カ月の間には、地球が球であることを体験することができ、というのは地上での観測距離よりトンネルの長さは短くなるという事実を確かめ、ある時は、観測誤差を上回るズレが斜坑基準点で検測され、その理由解明に苦労し、遂にその原因が坑内通気の温度勾配にあったことを突き止めたことなど、幾つかの貴重な経験をすることができた。ここにこの貴重な体験の一端を紹介する。

## 2. 津軽海峡の渡海測量

### 2.1 恵那山トンネルから青函トンネルへ

中央高速自動車道の恵那山トンネルは延長8,500 mで、スイスからイタリアに通ずる、モン

ブラントンネルに次ぐ、世界第2位の長大自動車トンネルである。恵那山トンネルは岐阜県側と長野県側の両坑口から掘削し、中央部でドッキングさせる工法を採用しており、貫通時の坑道のズレを最小にとどめるための測量システムは大事なものであった。恵那山トンネルの測量システム作りから参加し、無事に両坑口からの坑道をドッキングを成功させるまで測量作業を担当したのが、朝日航洋(株)の前身、東洋航空事業(株)であった。<sup>17)</sup>

昭和42年にはじまった測量作業では、両坑口の掘削方向を正しく決定することと、掘削中の方向の測定と点検に最大の関心を払った。坑口で水平方向に5秒の誤差は8.5 kmで、約20 cmの相違となり、垂直方向も標高の誤差が、そのまま合致点での差になってしまうからである。そこで両坑口の方向決定には三角網を作り、厳密平均計算結果を使うこととし、両坑口の標高は神坂峠(標高約1,600 m)を越えて実施する直接精密水準測量により決定することとした。またベンチマークは両坑口付近に各3点、路線沿いに5点設けた。

三角網の角観測にはウィルド社製万能経緯儀T<sub>3</sub>(0.2秒読)を使い、水平角の観測は3方向を一群にして夜間に、鉛直角の観測は昼間に実施した。またトンネルの基準点測量は、通常坑口付近の適当な場所で基線測量を行なって、三角網を作って位置を決めるのであるが、長大トンネルということで、恵那山トンネルではジオジメータにより三角網の辺長を直接測ることとし、その観測

\*朝日航洋(株)測地部

\*\* / 測地部部长

を夜間に行なった。

こうして日本最大の長大自動車トンネルである恵那山トンネルの貫通を昭和49年3月に無事迎えることができた。ここでの作業は、昭和45年4月以降に関与することとなる青函トンネルの測量作業にとって、貴重な経験となった。

## 2.2 精密測地網測量の経験

青函トンネル測量で技術力を発揮するうえにおいて、精密測地網測量の経験は極めて価値あるものであった。この精密測地網測量とは、建設省国土地理院が三角測量により設けられた三角点間の辺長を光波測距儀で100万分の1の高精度で、5年周期で測定しているものである。これは機器を置いて測るといった単純なものではなく、選点、造標、観測といった一連の作業であって、測量作業の基本であり、原点ともいえるものである。

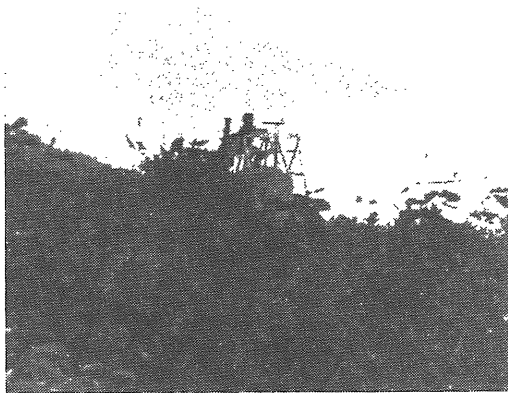


写真-1 視準標（回照器）

測定する三角点間の見通しを確認して観測槽（測標）を建てる場所と高さを決める選点、観測に必要な杉丸太を山頂まで搬入し、測標（槽）を建てるのが造標、三角点間の辺長を、誤差の影響の少ない日の出、日の入り前後2時間で測定するのが観測である。光波測距儀ではヘリウムネオンガスレーザを光源とし、40 kmの辺長を100万分の1の高精度で瞬時に測定でき、測標には光波測距儀を整置するためのものと、レーザ光線を反射するための鏡を整置するものとが作られる。

## 2.3 青函トンネルの貫通まで

### 2.3.1 渡海測量開始

昭和21年4月の地質調査の着手から18年経った昭和39年に斜坑掘削に着手、昭和42年3月に北海道側から、また昭和45年1月に本州側から先進導坑の掘削がはじまった。この昭和45年4月に東洋航空事業(株)が、日本鉄道建設公団から渡海三角測量・渡海水準坑口基準点測量、坑内測量の委託を受け、青函トンネル測量との深いかわりあいを持つことになる。それは昭和58年1月27日の先進導坑貫通後の今日まで続いている。



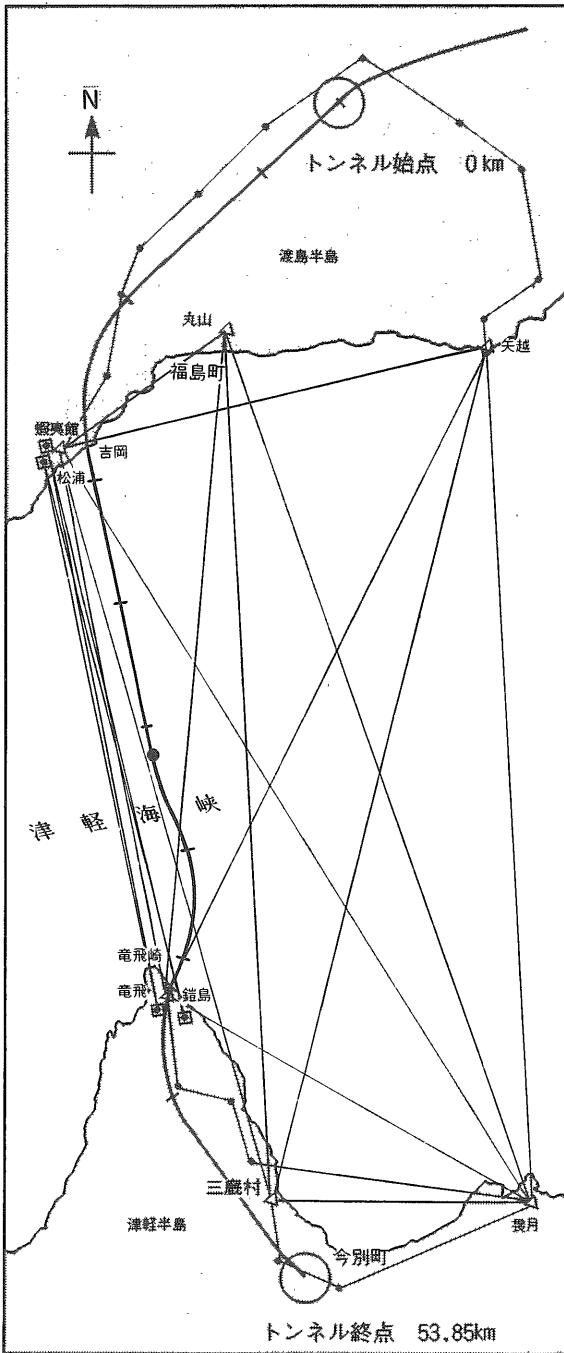
写真-2 先進導坑貫通点

青函トンネルの建設を担当する日本鉄道建設公団では、昭和39年に国土地理院に測量を委託する際に、水平位置も高さも10 cmぐらいの誤差でおさめたいとの要望を述べている<sup>16)</sup>。普通の地域であれば既設点から導き出しても、10 cmの精度は容易に得られるが、途中で点検の方法もない20 km以上の長いトンネルとなると、10 cmの精度とは大変に厳しい条件といえる。北海道の測量は津軽海峡で本州と隔離されており、一等三角網は結びついているが、二・三等三角点は、それぞれ別個に平均されていて直接の関連はなく、北海道側と本州側とで、それぞれ近くの既設点から誘導したのでは、精度が±30 cmぐらいにもなってしまう<sup>15,16)</sup>。

こうした理由から、渡海三角測量・渡海水準測量は着手され、陸上部30.6 km、海底部23.3 km、総延長53.9 kmの長大海底トンネルの測量システムが決定されたのである。

### 2.3.2 渡海三角測量

昭和45年6月北海道と本州間には相対的な地殻変動が考えられ、北海道と本州とが東西に離れるような運動をしているとの論文発表があり<sup>8)</sup>、渡海三角網の繰返し測量は、こうした状況のなかでスタートした。



● 精密多角点    △ 渡海三角点    □ 渡海水準点

図-1 渡海測点設置図

渡海三角測量では青森県津軽半島に渡海三角点3点(竜飛、三厩、巽月)、北海道渡島半島に3点(蝦夷館、丸山、矢越)の計6点基準点を設け、青函トンネル独自の三角網を組成し、光波測距儀(ジオジメータ8型)及び経緯儀(セオドライト

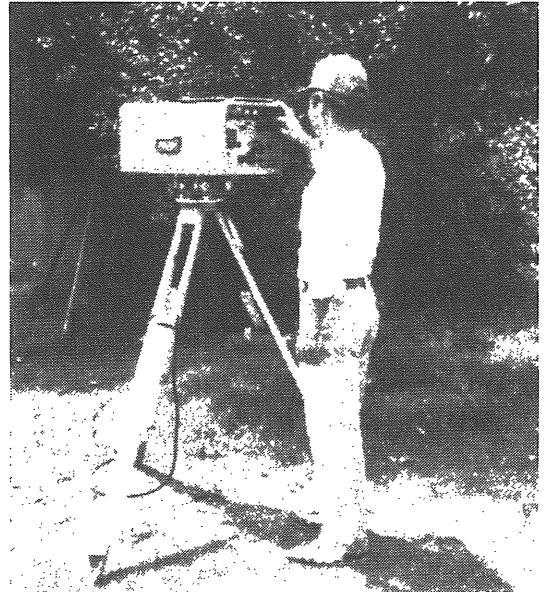


写真-3. ジオジメータ8型(60 km まで測定できる)

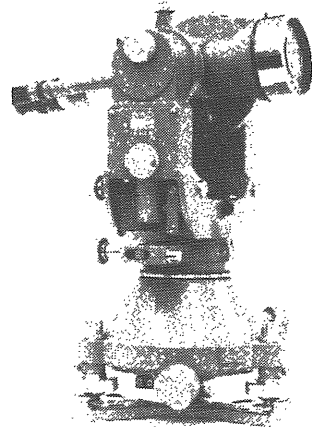


写真-4. セオドライトT3

T3) を使い、すべての観測は夜間に行なわれた<sup>8)</sup>。光波測距儀ジオジメータ8型の測定できる距離は15 m~60 km であり、長距離測定では光路の気温分布が精度に影響してくる。従来から行なわれている地上1 m 付近の気温では光路全般を代表しているとはいえないので、地上3 m の気温を使うこととした。その結果は表-1 に示すように、繰返しての測定で、良い一致をみた<sup>10)</sup>

また水平角の観測法は12対回の方向観測に相当する角観測法を採用し、観測差3秒、倍角差6秒、三角形の閉合差2秒の制限により水平角を観測した<sup>11)</sup>。表-2 に三角形の閉合差を示す。

表一 距離測量結果<sup>12)</sup>  
(単位: m)

区 間	昭45	昭47	昭49	昭51
婁月一矢越	34838.410	.387	.423	.385
婁月一竜飛	15413.013	.022	.034	.030
婁月一蝦夷館	35413.227	.262	.276	.241
竜飛一蝦夷館	22698.757	.752	.760	.750
竜飛一矢越	29484.523	.534	.553	.549
蝦夷館一矢越	17629.131	.133	.131	.148

表二 三角形の閉合差<sup>12)</sup>

三 角 形	昭45	昭47	昭49	昭51
竜飛一婁月一矢越	-0.89'	-0.08'	-0.52'	-0.14'
竜飛一矢越一蝦夷館	-0.86'	+0.23'	-0.08'	-0.09'
竜飛一婁月一蝦夷館	+0.90'	-0.09'	-0.99'	-1.04'
婁月一矢越一蝦夷館	-1.84'	+0.24'	+0.39'	+0.81'
一角の自乗平均誤差	±0.61'	±0.10'	±0.52'	±0.38'

2.3.3 渡海水準測量

渡海水準測量というのは経緯儀による三角水準測量のことであるが、視準距離が長いので、光の屈折からくる観測誤差が大きい<sup>16)</sup>。青函トンネルでは青森県側に竜飛、鎧島、北海道側に吉岡、松浦の計4点の渡海水準点を選点した<sup>15)</sup>。ここでは大気による影響を消去し易いように標高をなるべく等しくすること、及び50 m下に下測点を設けることとし、また観測は北海道側と青森側とで同時に行なった<sup>16)</sup>。

観測は竜飛～松浦、竜飛～吉岡、鎧島～松浦、鎧島～吉岡の4つの組み合わせについて行ない、水準点間の距離を光波測距儀(ジオジメータ8型)、鉛直角を経緯儀(ウィルドT3)で測定し、2点間の高低差を求めた。まず兩岸の上方測定に経緯



写真一五. 吉岡側から竜飛方向を測る

儀を装置し、相互の測標(回照器、太陽の光を鏡で反射させる)をトランシーバで連絡しながら同時に観測し、次いで相手方の下方側点に対して片観測を実施する、といった方法を用いる<sup>8)</sup>。

表一三 吉岡側の水準点の高さ<sup>10)</sup>  
(単位: m)

観 測 年	昭45	昭51	昭57
昼間観測値平均	88.3851	88.3336	88.3225
夜間観測値平均	88.1438	88.1466	88.2837

渡海水準点は精密水準測量によって比高を測定し、青森側を基点としてそれぞれの経路から吉岡の標高を算出する。表一三は昼夜観測の測定結果であるが、夜で昼より低くなっている。三角網は海上を挟んで最大35 kmあるので、測定された気温より光路の平均気温が1℃高ければ35 mm短く測定されることになり<sup>11)</sup>、水準の場合に低くなる。

2.3.4 斜坑測量と坑内測量

海底トンネル測量で生じた問題のうち、ここでは斜坑測量及び坑内測量に関連するものについて述べる。

吉岡斜坑基準点では昭和46年から47年にかけて3回水平角が観測され、その後昭和49年に検測したところ約20秒の差を生じていた。この量は10 km先では1 mの差となり、観測誤差には大きすぎる。この原因は坑道掘削の進展に伴ない斜坑内に新たに増設された排水管の熱源により大気が屈折をおこした結果によるものである<sup>9,11)</sup>。光の屈折について、縦方向についての関心は持たれていたが、横方向については注意が払われていなかった。実務的な試みとして、温度勾配による横屈折の補正を実施した結果、10秒もの大きな誤差要因となっていることが判明し、問題が解決できた<sup>11)</sup>。しかし、この斜坑内の温度勾配の違いによる光の屈折以外にも、換気用主扇風機の運転・停止状態によっても測定値の変動があり、最確値をつかむことができず<sup>12)</sup>、学術的には今後問題を残している。

海底部では本坑の横30 mに作業坑が掘削され、先進掘削されているが、この本坑と作業坑とは横坑により連結されている。このほかに地質調査を主要な目的とし、貫通点手前で作業坑と合流する先進導坑がある。この長い坑道を開放多角測量で進めねばならないので、精度向上には繰返し観測と、作業坑と本坑との間で可能な限りの結合または閉合網を組成するよう努力した<sup>11)</sup>。

また開放多角による最終点の横方向のずれは

$$\Delta S = \pm \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{6}} \cdot S \cdot d_0$$

ここに、 $\Delta S$ ：直角方向のずれ (m)

$n$ ：節点数

$S$ ：測点間の距離 (m)

$d_0$ ：測角誤差 (rad)

となる。<sup>12)</sup>

この式によれば海底中央部までの距離を 12 km、各測点での致心誤差を 0.5 mm とするときの横方向のずれは、測点間の距離 200 m で  $\pm 0.53$  m、400 m で  $\pm 0.19$  m となる。点間距離が長くなれば精度は良くなるが、工事基準点として現場で使用するには不便なので、200~300 m を標準とした<sup>11)</sup>。

### 3. 渡海測量の精度・誤差

#### 3.1 光波測量と気象

距離と、光路の空気屈折率とを同時に測定する多色光法は別として、通常的光波測量においては屈折率を正しく推定できたか、否かが精度を左右する。午前中に測った測線長は長く、午後には短くなるがあるが、光路全体の温度に比較し、午前中は高すぎ、午後には低く測定されていることによるものであり、その原因は気温及び気圧の日変化にある。<sup>5)</sup>

渡海水準測量でも、屈折率は位置的、時間的に変わるうえ、その影響する量の大きい点で、精度を高めるには細心の注意を払わなければならない要素の 1 つであり、これは正反同時観測では解消できない問題である。

青森県下北郡東端点及び折戸と北海道亀田郡戸井及び汐首山との正反同時観測でも、日中と夜間とで 6" (高さに換算して約 30 cm) にも達している。従って日中観測にかたよった方法でなく、日中、夜間、早朝及び夕刻の各時刻別観測を定期的に行ない、その地域の屈折の状況を検討してみる事が、観測初期においては必要である<sup>14)</sup>。

トンネルが貫通すれば、青森方と北海道方の基準点における高さの差はトンネル内を直接レベリングすることにより高い精度で測定できる。渡海水準測量の測定精度は貫通後に絶対値が明らかに

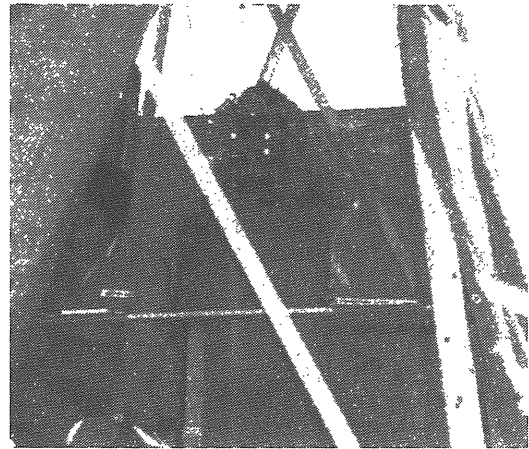


写真-6 渡海水準の観測

なり、その成果が問われることになる。

しかし先進導坑が貫通してみても、貫通前の誤差推定は左右、1.1 m、高低 30 cm (渡海水準測量による昼夜観測誤差を考慮)、長さ 50 cm 以内とされていたが、左右と高低については半分程度、長さについては微差であった<sup>13)</sup>。

#### 3.2 地殻の変動

1981年 8月に青函トンネルの海底部において重力測定が行なわれ、トンネル近傍の地質だけが原因とは考え難いような高異常が発見され、この異常の原因を基盤岩の盛り上りによるものとしている<sup>7)</sup>。

また三角測量結果から地殻変動を推定するのに角の変化量から直接、セン断ひずみを求めたところによると、最近 60 年間のひずみ速度が  $2.0 \times 10^{-7}$ /年以下のものが全体の 60% で、 $3.1 \times 10^{-7}$ /年以上のものは 16% となっている (この 16% のうち 66% は地震との相関がみられる)<sup>6)</sup>。ここで津軽海峡部をみると、最大セン断ひずみ速度は  $1.7 \pm 0.5 (\times 10^{-7}/年)$  となっており、熱海地区の  $4.0 \pm 1.2 (\times 10^{-7}/年)$  と比較して小さなものとなっている。

渡海測量における測量誤差を正確に知り、最小に抑えることは、観測値における変動が、地殻変動によるものか、あるいは測量誤差によるものかの判断素材になるだけに、特に大切なことなのである。

### 4. 対馬海峡の測量

佐賀県東松浦半島の沖合いに壱岐水道を挟んで壱岐があり、さらに対馬海峡を隔てて対馬がある。昭和40年6月に日韓基本条約が署名され、沿岸基線から12マイルまでの水域を漁業に関する専管水域とし、その外側には共同規制水域を設けて今日に至っている。

この対馬周辺を測量史からみると、離島の海岸線の測量には艦船が利用されており、明治24年(1891)の対馬瀬戸口にはじまり、明治30年(1897)に対馬全岸、明治31年(1898)に対馬中部、明治37年(1904)に対馬沿岸の測量が行なわれている。

昭和29年11月10日より12月9日に亘つて日本と韓国とを結ぶ一等三角網の観測が日米協同観測作業として実施され、地理調査所(現国土地理院)から対馬地方一等三角測量結果が報告されている。この報告では明治40年に観測されたものとの新旧観測角が比較されており、御岳(対馬)・有明山(対馬)・嶽ノ峰(壱岐)において新旧の差が3"~4"と大きな変化を認めている。これは測角の誤差にしては大きすぎ、対馬の変動を表わしていると考えられ、天上が岳(山口県)、大島(福岡県)、三瀬山(福岡県)および梨川内(佐賀県)の各点を不動と仮定して平均計算を行ない、対馬の御岳、有明山の変動ベクトルは1m内外で本邦側に向いているとの結論に達している。

また、更に水路部では昭和41年(1966)に対馬において対馬トーキングビーコン局の位置測定を行なっており、その際に三島灯台の位置測量もあわせて実施している。これは海図上の位置がズレているのではないかとの指摘に対して行なわれたものであり、次のように報告されている<sup>3)</sup>。

新旧比較	緯度	経度
海図位置	34 43 17	129 26 53.4
昭和26年10月改算	34 43 14.5	129 26 47.3
昭和41年3月測定	34 43 14.762	129 26 47.545

## 5. あとがき

トンネル掘削工事は昼夜兼行で進められているので、精密な測量は工事中を避け年末年始、お盆の連休など、一般の人が休む時期に行なわれた。青函トンネルの坑内測量は通常 mountain tunnel と異なり、地表から点検のできないこともあって、貫通を迎えるまで、つねに一抹の不安が脳裡から離れない。それは関係者の一員として大変に辛い

ことであった。青函トンネルでは測量成果から予想した通りに貫通したわけで、関係者としては精度的な問題を逐一解決して進んできており、当然の帰結であるとして自分に言い聞かせて、ここまで来たのであるが、やはり、ほっと胸をなでおろしたというのが実感である。

この青函トンネルで渡海測量を経験し、かつ総延長53.9 kmの長大海底トンネルを計画通りに貫通させたという実績をもとに、今後とも社会のために、ここまで蓄積したノウハウを役立たせることができればと、その機会を切に願っている次第である。

なお、最後に、渡海測量という貴重な体験の場を与えていただいた日本鉄道建設公団および終始、技術面でのご指導を賜った国土地理院、加えて関係者の各位に深く感謝すると共に、本文の執筆に際して有益な助言をいただいた朝日航洋(株)の篠重彦及び杉浦邦朗(前海上保安庁水路部長)の両氏に厚く御礼申上げる次第である。

## 文 献

- 1) 海上保安庁水路部(1971)日本水路史
- 2) 地理調査所(1955)対馬地方一等三角測量報告、測地学会誌、2、(2)、47-49
- 3) 水路部測量課(1966)対馬トーキングビーコン局・位置測定報告
- 4) 建設省国土地理院(1970)測量・地図百年史
- 5) 田中寅夫・細善信・和田安男・土居光(1983)岐阜県上室地域で行なっている光波測量への気象的影響、測地学会誌29(1)10-18
- 6) 中根勝見(1973)日本における定常的な水平地殻歪(Ⅰ)(Ⅱ)、測地学会誌19(4)190-208
- 7) 福田洋一・小菅正裕・中井新二・里嘉干茂・三品正明(1982)青函トンネル内における重力測定、測地学会誌28(4)193-202
- 8) 嶋田八朗・長島敏正(1973)青函トンネルの測量23(6)4-9
- 9) 中原昭夫・長島敏正(1977)青函トンネルの測量、測量27(5)1-4
- 10) 須田教明・嶋田八朗・長島敏正(1983)青函トンネル先進導坑貫通と測量、測量33(4)12-16
- 11) 長島敏正(1983)青函トンネル先進導坑の測量、APA(7)11-17
- 12) 持田豊・中原昭夫(1977)青函トンネルを測る、土木学会誌61(4)13-17
- 13) 竹内泰雄ほか(1983)青函トンネルの測量、トンネルと地下14(12)65-73
- 14) 大野欽一(1956)津軽海峡渡海水準測量に及ぼす大気の影響、測地学会誌2(3-4)532-538
- 15) 測地部(1966)青函海底トンネル基礎測量、国土地理院時報(31)539-549
- 16) 原口昇(1969)青函海底トンネルの基礎測量、トンネル工事講演集第4集550-555
- 17) 越山敏郎(1969)恵那山トンネルの測量、測量19(4)11-14