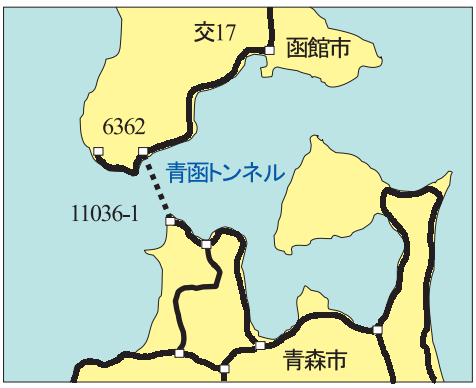
青函トンネルにおける一等水準測量
First Order Leveling Survey in SEIKAN Tunnel

測地部　大滝三夫
Geodetic Department　Mitsuo OHTAKI

要　　旨

国土地理院は，平成15年10月20日から11月６日にかけて，独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構（旧・日本鉄道建設公団）とJR北海道の協力を得て，青函トンネル内における一等水準測量を実施した。今回の作業は，第９回全国改測作業の一環として，本州と北海道間の高低差をより正確に求め，各種の測量に正確な基準を与えることを目的に行われた。

これまで，本州と北海道間の水準測量は，昭和62年に当時の日本鉄道建設公団が青函トンネル本坑内において精密水準測量を実施しているが，国土地理院が，青函トンネル内で一等水準測量を実施したのは，今回が初めてである。また，今回の作業では，青函トンネル内に設置した全ての水準点で相対重力測定（二等重力測量）を実施し，得られた重力値により正標高補正を行った。



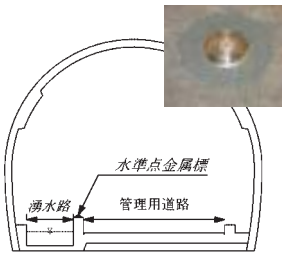
図－１　作業地域図

１．はじめに

青函トンネルは，昭和40年より本格的に建設工事が開始され，昭和60年に本坑が貫通，昭和63年３月にJR津軽海峡線として開業した（図－１）。電車が通る青函トンネル・本坑は，全延長が53.85kmあり，海底部は23.3km，海底下100mを通る世界で最も長い海底トンネルである。青函トンネルは，本坑の他に，本坑保守用の作業坑，湧水排出等のための先進導坑，これらと地上を結ぶ斜坑がある。なお，一等水準測量は，斜坑及び作業坑の全延長約25kmで実施した（図－２緑色部分）。

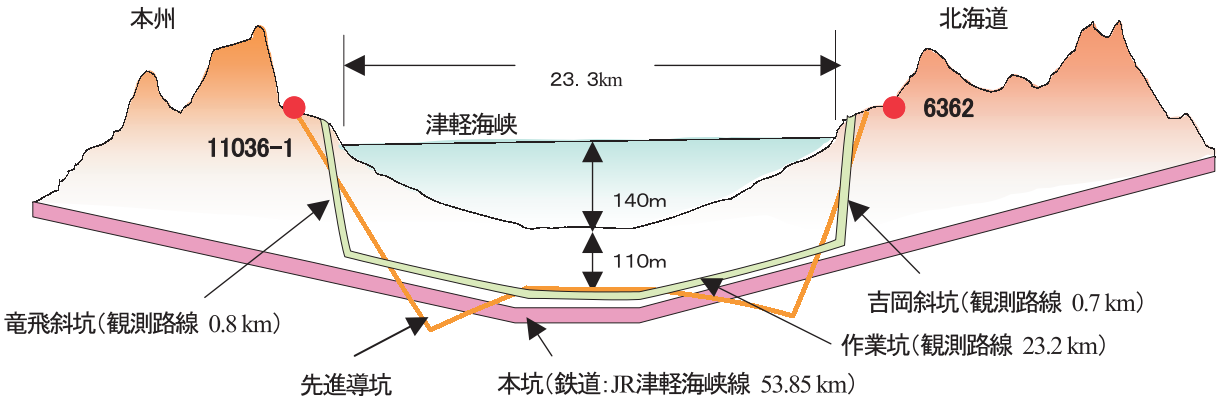
２．一等水準点の設置

国土地理院は，今回の測量に先立ち，平成15年８月に青函トンネル作業坑内の14カ所に一等水準点を設置した。水準点は金属標を用い，作業坑の縁石上面にコンクリートで固定した（図－３）。なお観測終了後，日本で最も低い水準点と，竜飛，吉岡両斜坑終点に設置した水準点に案内板を設置した（写真－１）。



図－３　水準点と設置位置

写真－１　案内板



図－２　観測路線立面図

表－１　観測路線の特徴

	傾斜	路　面	明るさ	温度・湿度	その他
竜飛斜坑	25%	石段 1316 段	作業坑より明るいが，手持ちの照明なしでは，目盛が読み取りにくい。(N3)	温度・湿度とも外気の影響受けるが，送風止めると安定。	下降する程に気圧が上昇。 地上＋20hPa
竜飛海底駅	３%	コンクリート	明るい。ほぼ地上と同じ。	温度 18～20℃安定。 湿度 95%以上	気圧調整用鉄扉で気圧安定。
作業坑	1 ～ ３%	コンクリート 滑りやすい。 幅員狭い。	20ｍ間隔に蛍光灯があるが，手持ちの照明なしでは暗く観測不可能。	温度 18～20℃安定。 湿度 95%以上	気圧調整用鉄扉で気圧安定。本坑の振動影響なし。
吉岡海底駅	３%	コンクリート	斜坑とほぼ同じ明るさ。	温度 18～20℃安定。 湿度 95%以上	気圧調整用鉄扉で気圧安定。
吉岡斜坑	25%	石段 1183 段	作業坑より明るいが，手持ちの照明なしでは，目盛が読み取りにくい（N3)。	温度・湿度とも外気の影響受けるが，送風止めると安定。	下降する程に気圧が上昇。 地上＋20hPa

３．観測路線

観測路線は，一等水準点11036-1から竜飛斜坑，作業坑，吉岡斜坑を通って一等水準点6362までの約25kmである（図－２）。観測路線の特徴を斜坑，作業坑，海底駅付近に分けて表－１に示す。

なお，海底駅は竜飛海底駅，吉岡海底駅の２ヶ所があり，それぞれ作業坑と連結している。

写真－２　竜飛海底駅付近

写真－３　吉岡斜坑

写真－４　青函トンネル作業坑

４．作業実施状況

４．１　作業坑内での注意事項

本作業を実施するにあたり国土地理院は，JR北海道及び独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構と綿密な打合せを行った。

打合せの中で作業坑内での注意事項として，①気圧調整用鉄扉の開閉，②坑内入出時，作業開始及び終了時の連絡，③坑内禁煙等について作業員への徹底を要請された。とくに気圧調整用鉄扉は，隣接する鉄扉を同時に開けると送風されている空気が一気に流れ出し，鉄扉が閉まらなくなって大事故になる危険性があるとの説明を受け，作業では厳重な注意を払った。

４．２　斜坑，作業坑内での移動

吉岡斜坑の昇降は，人車を利用し，竜飛斜坑の昇降は，(財)青函トンネル記念館が運行するケーブルカーを利用した。また，作業坑の移動では，作業坑専用の作業車を利用した。作業車は１台で，１班ずつしか移動できないため，後発班は作業開始がかなり遅れる場合もあった。

作業坑は，トンネルの保守点検作業等で，頻繁に作業車が往来する。作業坑の幅員が狭いため，標尺台は道路中央に置き，作業車通過による標尺台の移動を回避した。また，観測中に作業車が近づいてきた時は，観測を一時中断するか，または作業車に，その測点の観測が終了するまで停止を要請して作業の安全確保に努めた。

写真－５　竜飛側斜坑

写真－６　作業坑内の作業車

４．３　観測の概要

今回の作業では，北海道及び東北地方測量部の職員により、それぞれ１班ずつ観測班を編成し，レベルの性能を比較・検証するために，北海道班はティルティングレベル（WILD N3)，東北班は電子レベル（ツアイスDINI 11）を使用して観測を実施した。なお，作業坑内の観測では，天井が低く３ｍ標尺が使用できないため，両班とも２ｍ標尺を使用した。

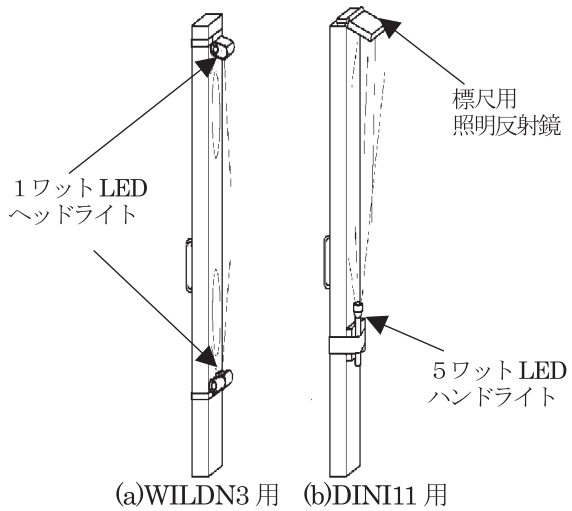
写真－７　作業坑での観測

写真－８　斜坑での観測

４．４　作業坑内の観測条件と対策

４．４．１　標尺の照明

作業坑内には，片側壁面に20m間隔で蛍光灯が設置されている。しかし，観測では，蛍光灯だけでは光量が足りず，全ての観測点において標尺照明装置を使用した。今回の青函トンネル内における観測では，この標尺照明装置の選定，使用上の工夫等にかなり労力を費やした。標尺照明装置は，①測定可能な明るさであること，②軽量であること，③できるだけ長時間使用できること等が必要条件である。観測では，その必要条件に最も適合したLEDライトを使用した。



図－４　標尺照明装置

ティルティングレベルの観測では，角度調整が可能なLEDヘッドライト（１ワット）を標尺の上下に取り付け（図－４(a)），視準位置に合わせて照らす位置を変えた。一方，電子レベルでは，バーコード標尺を読み取るために，上下幅が30cm以上の均一な光が必要であることから，５ワットの強力なLEDハンドライトを標尺に取り付け，標尺上部に照明反射鏡を取り付けて一定幅の均一な光を確保した（図－４(b)）。

写真－９　標尺目盛，気泡管の照明

また，光量不足や蛍光灯の逆光など測点毎の条件によっては，補助照明として器械手や安全保安員のハンドライトを利用した。なお，標尺気泡管の照明には，胸のポケットに取り付けたままで，照らす位置が調節できるフレックスライトを使用した（写真－９）。

４．４．２　湿気対策

作業坑の観測におけるもう一つの課題は，湿気対策である。作業坑内の湿度は90％以上あり，その影響で外部から持ち込んだ観測機器は結露した。とくに電子レベルの結露がひどく，観測初日には，作業坑内に持ち込んでから１時間以上も結露が治まらなかった。そこで電子レベルは地上に持ち帰らず，器械ケースごとビニール袋に詰め，乾燥剤を入れて作業坑内に保管した。それ以降，結露は少なくなったものの，時々観測中に結露したり，レンズが曇ったりすることがあった。その都度，ガーゼで拭き取りながら観測を続けたが，観測８日目の終了間際に，湿気の影響によると思われるコンペンセータの不具合が発生した。その日の観測は何とか終了させ，翌日からは予備の器械で観測を実施した。

４．４．３　その他の観測条件

青函トンネル全体には，斜坑脇の送風口から常時空気が送り込まれている。斜坑の観測時には，送風による観測への影響を懸念し，JRの協力を得て送風を停止した。また，作業坑内は気圧が地上より20hPa高いため，幾重もの気圧調整用鉄扉で通気を遮断して，トンネル全体の安定した通気を確保している。気圧調整用鉄扉は，隣接する鉄扉と同時に開けることができないため，鉄扉通過時は，細心の注意を払った。

本坑との連絡坑付近では，本坑を電車が通過した時の轟音や振動が気になるとともに，少しの間，霧が発生して視界が悪くなる。気圧の変化が原因と思われるが，４～５分経つと霧は晴れるため，観測には支障がなかった。

写真－10　気圧調整用鉄扉

写真－11　トンネル内の霧

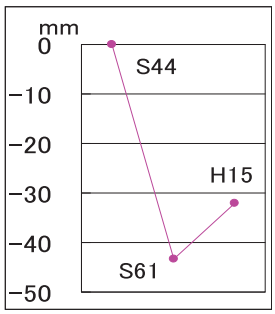
４．５　観測結果

４．５．１　前回観測結果との比較

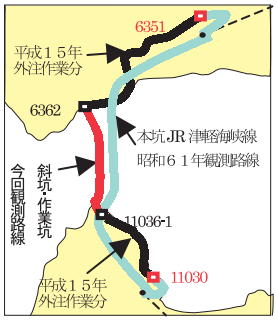
今回実施した２機種のレベルによる観測のうち電子レベルの観測結果を用いて，昭和62年に実施した本坑における水準測量結果（旧・日本鉄道建設公団が実施）及び昭和44年平均成果と比較した（表－２）。

表－２　本州―北海道間高低差の比較

観測年及び計算年	11030→6351 の高低差
昭和 44 年度平均成果	＋31.6489　m
昭和 62 年本坑内の観測値	＋31.6055　m
平成 15 年観測値	＋31.6168　m



図－５　11030→6351間の高低差の変化



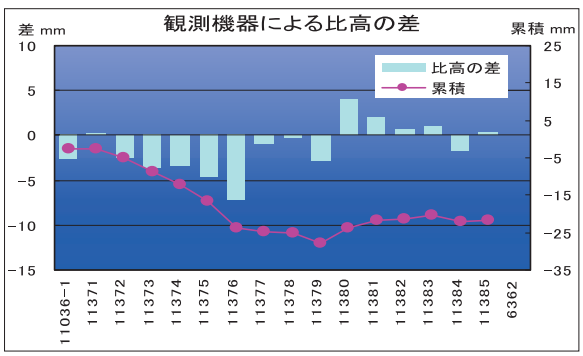
図－６　観測路線図

昭和44年の網平均計算は，原点を固定して本州，四国，九州で行われ，北海道は，昭和47年に忍路験潮場を固定して独自に計算された。昭和44年平均成果と昭和61年観測値との差（43.4mm）は，分離した網平均計算手法が影響した可能性がある。今回の観測値と昭和61年観測値の差は11.3mmである。本州と北海道間の高さは，直接水準測量を実施することで，より正確に連結されたと言える。

４．５．２　２つの観測値の比較

今回は，海底下100mのトンネル内という特殊な条件下での観測であり，異なる機種のレベル（WILD N3とDINI 11）を使ってレベルの性能を比較・検証した。

WILD N3とDINI 11による観測結果を比較すると，高低差の差が許容範囲を超える区間が半数以上に達し，とくに吉岡，竜飛の両斜坑と，観測開始当初１～２日目の区間は差が大きい（図－７）。このように２つの機種による観測値に差が生じた原因には，次のようなことが考えられる。

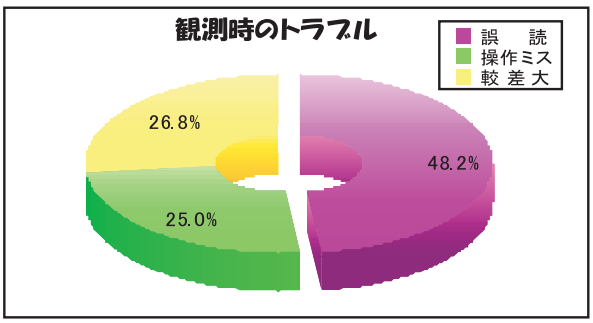


図－７　WILD N3とDINI 11による観測比高の比較

一つは，光量不足の問題で，観測では，前項で詳述したように様々な工夫を凝らして実施した。DINI 11では，視準距離が制限される（最大視準距離 27m）ものの，バーコード標尺読み取りに可能な一定幅の安定した光量を確保することにより，良好な観測結果が得られた。一方，WILD N3では，作業効率を高めるために，標尺に取り付けた照明装置に加え器械手や安全保安員のハンドライトを利用し，最大視準距離40mを確保して観測を実施した。しかし，観測は，ライトで照明しながらのクロスヘアや目盛の視度調整，気泡管の微調整や光量不足のままの目盛読み取り等，僅かな妥協が観測誤差に結びつく極度のプレッシャーの中で行われたため，個人誤差のないDINI 11と比べると，測点毎の微少な観測誤差が累積した可能性がある。

二つ目は，観測者の経験の問題である。WILD N3による観測内容を分析すると，１区間の往復観測で平均３回の誤読があり，観測中のトラブルの中で最も多い（図－８）。ただし経験不足を補うために，作業前には繰り返し観測練習を行ったため，較差超過による読み直しが少なく（１区間往復２回），１測点の平均観測時間もやや遅い程度である。以上の検討結果からWILD N3とDINI 11による観測結果の差の主な原因は，機種の性能によるものでなく，WILD N3の観測値に特殊な観測条件による観測誤差が累積したためと思われる。

今回の作業から機種の性能に関連して整理すると，DINI 11は目盛を電子的に読み取るため，人工的な照明では，どうしても視準距離が制限される。また湿気による結露がひどく，コンペンセータの不具合が生じる原因にもなった。一方，WILD N3では，照明設備と体制が整備できれば通常の観測が可能で，性能上の問題はない。



図－８　WILD N3による観測時のトラブル

５．正標高計算

５．１　理論的な考察

通常，正標高補正量は，ブーゲ異常グリッドから球面地形補正計算を含めた内捜手法によって推定した各水準点の重力値を用いて計算する。この方法では，重力測定点が地形面上にあるという仮定を用いた地形処理が行われているため，トンネル内など地中にある水準点の重力値は推定できない。今回は，一等水準測量と並行して二等重力測量を実施し，トンネル内にある水準点の重力値を求め，それによって正標高計算を行った。

また，通常の正標高計算では，水準点からジオイド面までは，平均密度2.67g/cm^{3}の地殻と仮定している。しかし，青函トンネルは海底下にあるため，水準点とジオイド面の間は地殻部分と海水部分が混在していることを考慮して、密度を求める必要がある。

写真－12　二等重力測量

写真－13　斜坑内での観測

5．2　正標高の計算方法

正標高計算は，(1)式によって区間毎の正標高補正量を計算し，それを観測高低差に補正して各水準点の正標高を求めた。

$$\Delta G=\left[\left\{\frac{(g_P+g_Q)}{2}\right\}-\gamma_0\right]\times\frac{\Delta h}{\gamma_0}+H_P\times\frac{(G_P-\gamma_0)}{\gamma_0}-H_Q\times\frac{(G_Q-\gamma_0)}{\gamma_0} \quad (1)$$

ΔG：正標高補正量（mm）

g_P, g_Q：水準点P，Qにおける地表重力値（mgal）

Δh：水準点PからQの観測比高（m）

γ_0：基準緯度45°における正規重力値（mgal）

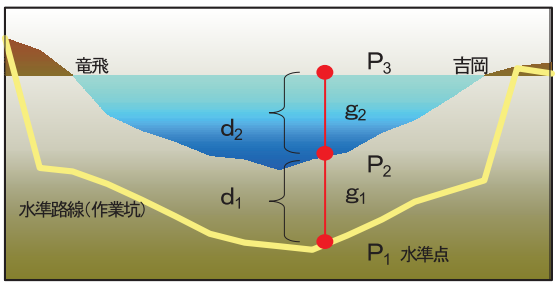
GRS80：980619.92mgal

H_P，H_Q：水準点P，Qにおける正標高（m）

求点は概算正標高とする。

G_P，G_Q：水準点P，Qにおける鉛直平均重力値

地表～ジオイド面間の平均重力値（mgal）



図－９　青函トンネル鉛直断面図

ここで，(1)式の鉛直平均重力値は，地殻部分の平均密度を2.67g/cm^3，海水部分の平均密度を1.03g/cm^{3}として計算した。図－９において，水準点P_1における鉛直平均重力値g_mは，

$$g_m=\{(g_1\times d_1)+(g_2\times d_2)\}/(d_1+d_2)$$

ただし，$g_1=g_P-(0.0424\times d_1)$

$g_2=g_P-(0.0848\times d_1)-(0.1111\times d_2)$

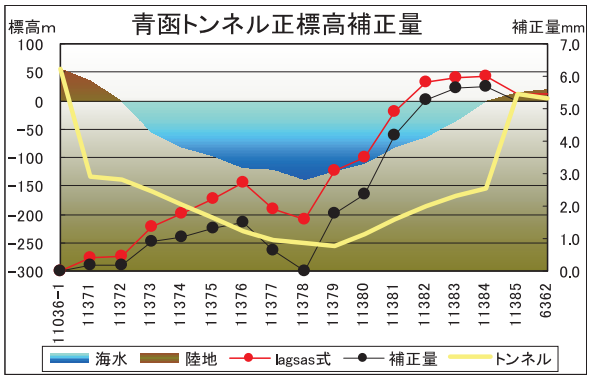
となる。

なお，海水部分の厚さ（d_2）は，海図から読み取った水深で，地殻部分（d_1）は，水準点の概算標高から海水部分（d_2）を差し引いた値である。

5．3　計算結果

5．3．1　正標高補正量

図－10は，竜飛側の水準点11036-1を起点にした正標高補正量の累積状況（●）を示したものである。海水部分と地殻部分を考慮しないで計算した補正量（●）と比較すると，路線全体では殆ど差がないが，海水が最も深い所の水準点で1.6 mmの差が生じた。



図－10　正標高補正量の累積

5．3．2　平均正標高の計算

正標高補正量の計算結果を観測高低差に補正し，各水準点の概算正標高を求めた。さらに，竜飛側の一等水準点11036-1と，吉岡側の一等水準点6362を既知点にして，トンネル内に設置した一等水準点の平均正標高を計算した。計算では，電子レベル（ツアイスDINI 11）による観測値を用いた。その結果，日本で一番低い水準点は，青函トンネル作業坑の中間地点に設置した「11379」で，高さは「－256.5674m」であった。

6．まとめ

青函トンネル内における水準測量は，平成14年２月にトンネル内予備調査が開始されてから，実質２年で，水準点埋設，観測等すべての作業が終了した。この結果，北海道と本州は高い精度で結び付けられ，トンネル内に設置された水準点の正標高は精度良く決定された。

今回の作業は，毎日がトンネル内での作業でありストレスの大きさは計り知れない。とくにWILD N3による観測は，このストレスに加え，ライトで照明しながらのクロスヘアや目盛の視度調整，気泡管の微調整や光量不足のままの目盛読み取り等，僅かな妥協が観測誤差に結びつく極度のプレッシャーの中で行われた。それでも観測前の予備調査，準備等が入念に行われたことや、心身両面からの健康管理に留意したことで良好な観測結果が得られ，体調を崩す人もなく作業を無事に終了することが出来た。

謝　　辞

海底下にある水準点の正標高を計算するにあたって、黒石裕樹氏（国土地理院地理地殻活動研究センター宇宙測地研究室　主任研究官）より指導・助言を頂いた。深く感謝致します。

参　考　文　献

黒石裕樹（2003)：海面下トンネルにおける重力・水準測量からの標高決定について，国土地理院技術報告書
福崎順洋，大滝三夫（2003)：正標高計算の高度化に関する調査，国土地理院技術報告書