

ノンプリズムレーザを用いた人工干潟測量の研究と実験

重松 文治* 帯田 俊司**
上田 正樹*

要 旨

人工干潟や人工海浜工事における汀線測量は、測量船や測量車が立ち入ることができない場合、人力での測量を行っている。しかし、人力測量は潮の干満に合わせて作業を行うために長時間に及ぶ測量が必要であり、迅速かつ精度の高い測量方法が求められていた。

筆者らは、このような要求を満足する測量方法の一つとして、測量対象物へのミラー設置を必要としないノンプリズムレーザ式トータルステーションに着目した。ノンプリズムレーザ式トータルステーションは最近の技術であり、人工干潟や人工海浜工事における汀線測量での利用例はないため、高所作業車へ、ノンプリズムレーザを搭載してGPS測量と比較することにより精度を確認し、良い結果が得られた。

本報告はこれらの検討結果と実験結果についてまとめたものである。

1. はじめに

人工干潟や人工海浜工事(写真-1)における汀線測量は、測量船や測量車が立ち入ることができない場合には人力で測量を行っている。このような場所における効率的な測量システムとして最近開発された遠方から非接触で測量が可能な測量方法であるノンプリズムレーザ式トータルステーション(以下 TS と称す)が利用可能であるか調査した。

ノンプリズムレーザ式 TS は光源にレーザを用いており、測量対象物へレーザを照射し、測量対象物からの散乱光を受光することにより、距離と位置を測るシステムである。ノンプリズムレーザ式 TS の一般利用方法は、測量対象物へ直角に近い角度でレーザを照射して距離と位置を計測するものである。

しかし、人工干潟や人工海浜工事における汀線測量での利用方法は、図-1に示すように高所作業車などへ搭載して斜めに測る方式となる。レーザを斜めに照射するとレーザのスポット径拡大や、反射率の低下などによって以下の問題が予想された。

- ①レーザの拡散と測距・測角による測量精度の低下。
- ②レーザの反射率低下による測量距離の短縮。

本実験では、ノンプリズムレーザ式 TS を高所作業車に搭載して測量精度と測量可能な距離について検証した。その結果について報告する。

2. 測量機器の選定

2.1 人工干潟測量の特徴

現在、人工干潟の測量方法は、確立した方法はない。そこで、現在、考えられる方法について、調査・検討を行った。

(1) 人工干潟測量の課題

* 技術研究所
** 東北支店



写真-1 人工干潟の例
(広島県五日市人工干潟-24ha)

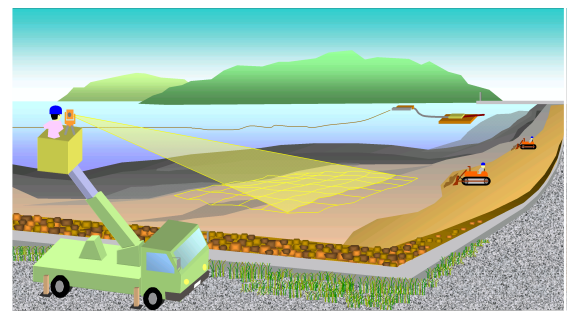


図-1 ノンプリズムレーザ式 TS のイメージ

人工干潟測量には以下の課題がある。

- ①水深が浅く測量船での測量が困難。
 - ②表層が軟らかく測量車や人力での測量が困難。
 - ③人力測量(潮間作業)は測量に時間がかかる。
- (2) 現在考えられる測量方式について
人工干潟測量への適用可能性がある測量方式と精度に

ついて図-2を用いて説明する。

①RTK-GPS(リアルタイムキネマティック測位)と超音波測深器+測量船

水面下のみ測量可能である。

②RTK-GPS+測量車(バギー車)

GPSを搭載した測量車で測る。

③レベル測量

高さは高精度であるが測位は測れない。

④プリズム式 TS

ミラーを測点に設置してトータルステーションで追尾する。

⑤写真測量

デジタルカメラを2台並べてステレオ画像計測を行なう。

⑥ノンプリズムレーザ式 TS

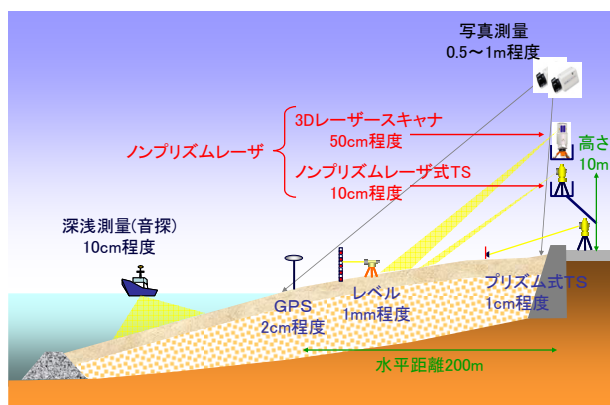


図-2 人工干潟の出来形管理装置の種類と鉛直精度

(3) 目標精度

完成時の出来形管理は従来の深淺測量の精度を目標にする。表-1に出来形管理と施工管理の目標精度を示す。

表-1 目標精度

	出来形管理	施工管理
到達距離	200m~300m	200m~300m
水平精度	1m	2m
鉛直精度	0.1m	0.3m

2.2 無人化測量を対象とした各種測量方式

ここでは、人工干潟や人工海浜工事における汀線測量において、人が直接測量地点に立ち入ることなく、無人化測量が可能な方式について検討する。

2.2.1 GPS 測位方式

GPS 測位方式には、図-3に示すように各種測位方式がある。その中で最も高精度な測位方式は、RTK-GPS と呼ば

れる方式である。その精度は水平方向(X, Y)で1~2cm、鉛直方向(Z)で2~3cmである。

本方式は、写真-2に示す移動体計測装置(移動局)の他に、写真-3の基準局を必要とする。基準局はその観測した補正データを通信システムを介して移動局へ伝送する。移動局ではその補正データを利用し、リアルタイムに移動局の測位計算を行い結果を出力する。

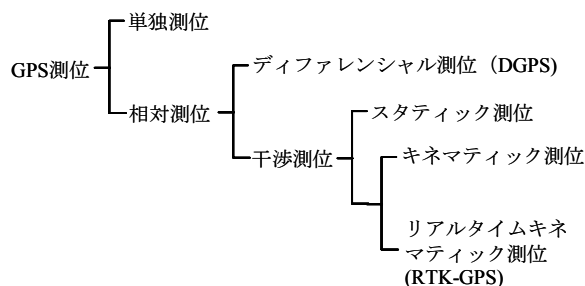


図-3 各種 GPS の測位方式



写真-2 RTK-GPS の移動局



写真-3 RTK-GPS の基準局

GPS 測位は従来の測量機器に比較して多くの特徴がある。しかし、GPS は決して万能ではなく、測量する目的や必要精度に応じてトータルステーションなどの光学測量機器と使い分ける必要がある。以下に従来の光学測量方式と比較した場合のGPSの長所と短所を示す。

(1)GPSの長所

①直接の見通しが効かない測定点間の測量ができる。

- ②平面位置だけでなく高さも得ることができる。
- ③短時間で測量できる。
- ④長距離でも容易に測定できる。
- ⑤天候に左右されず夜間も測定が可能である。

(2)GPS の短所

衛星からの電波を用いる方式のため、次の制約がある。

- ①上空が開けていることが必要であり、建物の中、水中、地中、密集した林の中などでは測位できない。
- ②建物の近くではマルチパス(電波の反射)の影響を受けて精度が劣化する。
- ③高精度な受信機は高価である上、別に基準局を必要とする。

2.2.2 写真測量

写真測量 (photogrammetry) とは、写真という平面に写された像の幾何学的形状から被写体の 3 次元形状を求める技術のことである。いまや地図の作成といえば空中写真を用いるのが常識となっている。最近では、デジタルカメラやパソコンの出現により、写真測量した画像をそのまま現場にて速やかに解析し結果が得られるようになった。以下に基本技術と特徴について説明する。

(1)ステレオ画像計測

人間が物を見るとき 1 つの眼では物の平面的配置が分かるのみであるが、2 つの眼で見るとおのおのの網膜に映る像が多少食い違う結果、物の奥行きが分かり 3 次元的配置が分かる。この両眼立体視して得られる画像をステレオ画像と呼ぶ。

図-4に示すように、ステレオで撮影された 2 枚の写真の撮影位置と方向が既知で、写真上に写されている同一点 (P1, P2) が認識されると、撮影点位置と観測点を結ぶ直線が交差する空間上の点として 3 次元座標 P(X, Y, Z) が算出される。

(2)ステレオマッチング

ステレオマッチングとは、図-4に示すように 2 枚のステレオ画像の一方の点が他方のどこに当たるかを判別する技術のことである。

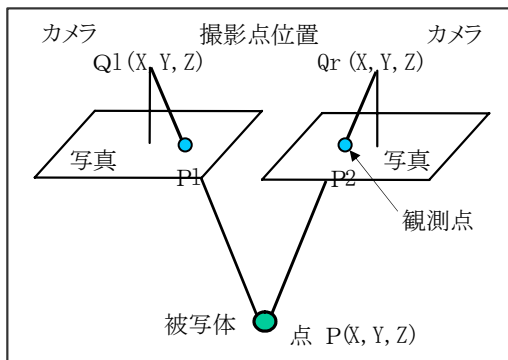


図-4 ステレオ画像計測の概念

人間では、ステレオ画像を眺め容易に観測点をマッチングさせることができるが、デジタル処理された2つの画像をコンピュータにて判定させるのは、形状、色調などが微妙に異なるので容易ではなく、観測点付近の類似度で判定している。

(3)標定

撮影された 2 枚のステレオ画像から画像上の点 P の 3 次元座標値を算出するため、画像(カメラ)ごとの撮影点位置 $Q_l(X, Y, Z)$ 、 $Q_r(X, Y, Z)$ と撮影方向を求める必要があり、これら 6 つの要素を決定する操作を外部標定と呼ぶ。この外部標定を行うためには被写体上に標定点(ターゲット)を設置する必要がある。

(4)システム構成

図-5にシステム構成図を示す。計測架台に 2 台のデジタルカメラを設置し、同時シャッター装置で同期を取り撮影する。データ処理部は、デジタルカメラをコントロールする撮影装置、映像をステレオ解析する解析装置、帳票など解析結果を出力するプリンターから構成される。

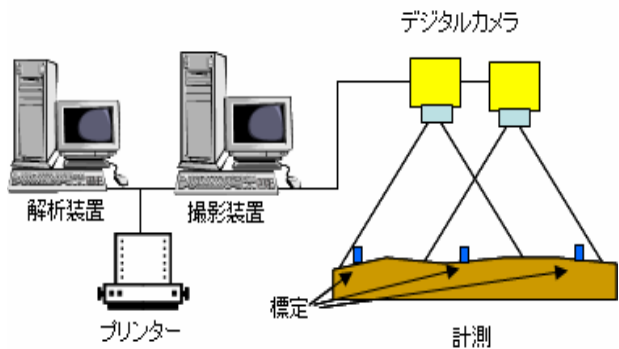


図-5 システム構成図

(5)ステレオ画像計測の特徴

①画像マッチングポイント(標定点)

単一な砂(泥)では、マッチングポイントが見出し難いため、被写体上に標定点を設置する必要がある。

②精度を確保するためには、画像 1 枚当りの解像度を高くする必要があり、画像 1 枚に写る範囲が狭くなる。

③カメラを 2 台離して設置する必要があるなど作業性が悪い。

2.2.3 ノンプリズムレーザ

従来の光波測距儀はプリズムを使用していたが、近年、プリズムを使用しない光源に半導体レーザ(赤外光)を用いたノンプリズムレーザ式測距儀の技術開発が進み、ノンプリズム測量距離で最大 1km という製品が開発された。ノンプリズムレーザの測量機器は対象物に対してレーザを直角に当て、反射してくるレーザから距離と位置を計測するものである。

ノンプリズムレーザには TS 方式と、3D レーザスキャナー方式と呼ばれるタイプがある。

(1) ノンプリズムレーザ式 TS

従来のミラー式の TS を、ノンプリズムとしたものである。

ノンプリズムレーザ式 TS の測定原理は、レーザが測量対象物で反射して帰ってくるまでの時間から距離を算出し、またレーザの移動方向角度から角度を算出し、この距離・角度情報から 3 次元位置情報を求めるものである。

各測点に対し、TS 本体が首を振りながら 1 点毎にレーザを照射して測るため、広範囲な測量だと時間がかかる。

(2) 3D レーザスキャナー

基本原理はノンプリズムレーザ式 TS と、3D レーザスキャナー方式は共通である。3D レーザスキャナーは専用で設計・製作されており、測量機器本体に内蔵された可動ミラーにレーザを反射させて照射するため、高速でスキャニングできるのが特徴であるが高価である。

これに対して計測時間はかかるがノンプリズムレーザ式 TS 方式の方が精度が良く安価である。

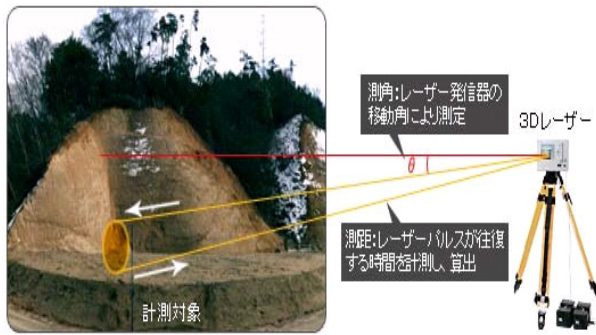


図-6 レーザスキャナーの原理

2.3 各種測量方式の精度比較

無人化測量を対象とした前述の測量方式、RTK-GPS、写真測量、ノンプリズムレーザについて比較する。測位距離については RTK-GPS が一番長く、ノンプリズムレーザの測位距離は、レーザの入射角や対象物の反射率より異なりこれより短くなる。

各種測量方式の精度は以下のとおりである。

(1) RTK-GPS の精度

水平方向 (X, Y): $10\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$

鉛直方向 (Z): $10\text{mm} + 2\text{ppm} \cdot D$

ここで、D: 基準局から移動局までの距離 (ppm=10⁻⁶)

例えば、基準局から移動局までの距離が 10km の時には、水平方向 (X, Y) で 20mm、鉛直方向 (Z) で 30mm と長距離でも安定した精度が得られる。

(2) 写真測量の精度

写真測量ではデジタルカメラを航空機などに搭載して、数

百メートルの高度から撮影して、画像マッチングを行なっている例もある。その精度は以下のとおりである。

水平分解能 (ΔX, ΔY): $(p \cdot H) / f$

鉛直分解能 (ΔZ): $(p \cdot H^2) / (f \cdot B)$

ここで、p: 1 画素サイズ

B: カメラ距離

H: 撮影距離

f: 焦点距離

例えば 200 万画素数のカメラで 1 画素サイズ約 10 μm、カメラ間距離 5m、撮影距離 100m、焦点距離 20mm の場合、水平分解能は 5cm、鉛直分解能は 100cm の精度である。現実的ではないがカメラ間距離を 10m に広げて見ると、鉛直分解能は 50cm の精度となる。

(3) ノンプリズムレーザの精度

ノンプリズムレーザの精度は、レーザのスポット径と、測量対象物へのレーザ入射角の影響を最も受ける。

図-7 に示すように、測量距離が一定の場合には、ノンプリズムレーザの設置高さが低いほどレーザのスポット径が大きくなる。

図-8 および図-9 にレーザ拡散角 3mrad (0.17°) のノンプリズムレーザの設置高さや測量距離を変化させて、水平方向 (X, Y) と鉛直方向 (Z) の精度シミュレーションを行なった結果を示す。

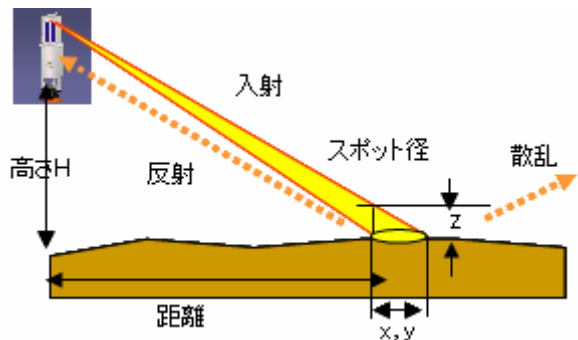


図-7 ノンプリズムレーザの設置高さの違いによる精度

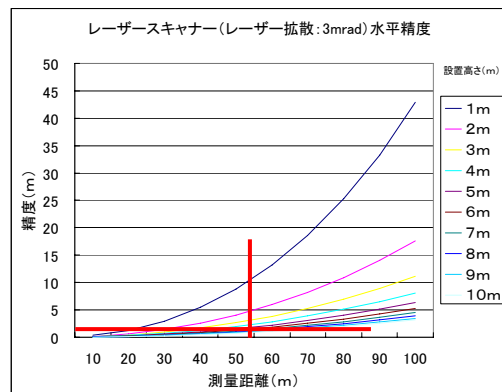


図-8 ノンプリズムレーザの設置高さや水平 (X, Y) 精度

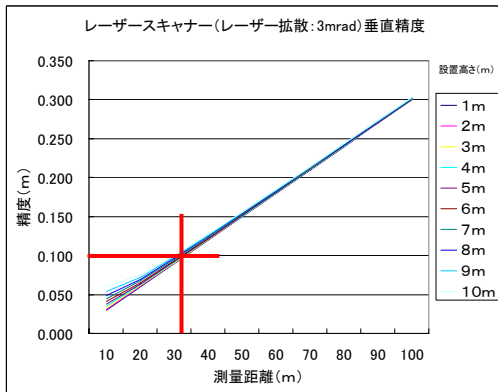


図-9 ノンプリズムレーザの設置高さ(鉛直(Z)精度

この結果からわかるのは、精度を向上させるためには、ノンプリズムレーザの設置高さをあげることであるが、利用できる高所作業車の高さには限界があるため。精度向上のためにはレーザのスポット径をより小さいシャープなものにする必要がある。

これまで、検討した結果を表-2にまとめる。

人工干潟や人工海浜工事における汀線測量には、ノンプリズムレーザが最適であることがわかる。

表-2 GPS、写真測量、ノンプリズムレーザの比較表

	RTK-GPS	写真測量	ノンプリズムレーザ
測位距離	10km	数 100m	1km 以内 反射率と入射角の影響大
水平精度 X, Y	10mm + 1ppm・D	分解能 $\frac{p \cdot H}{f}$	図-7 参照
鉛直精度 Z	10mm + 2ppm・D	分解能 $\frac{p \cdot H^2}{f \cdot B}$	図-8 参照
長所	直接 X, Y, Z が得られる	遠方から一度に広範囲が計測可能	遠方から計測可能
短所	・基準局が必要 ・測る位置へ移動	・標定が必要 ・夜間は不能	1 点計測ごとにレーザの向きを変える
総合判定	△	△	○

D: 基準局から移動局までの距離

p: 1 画素サイズ、B: カメラ距離、H: 撮影距離、f: 焦点距離

2.4 ノンプリズムレーザの機種選定と詳細調査項目

ノンプリズムレーザの中で人工干潟や人工海浜工事における汀線測量に最適な機種を選択する。

表-3に、各種ノンプリズムレーザの仕様の比較を示す。この中で最も高性能な機種は、ノンプリズムレーザ式 TS である T 社の機種 C、測定距離 1200m、レーザ拡散角 0.3mrad である。

写真-4の左に、これまで比較の対象とした 3D レーザスカナーである R 社の機種 B を、右に、T 社の機種 C を示す。

この 2 つの機種の最も大きく異なる点は、測定速度が R 社の機種 B は 10000 点/秒に対して、T 社の機種 C は 1 点/秒という点である。

表-3 レーザ式の一次選定

機種	メーカー	測定距離	評価	レーザ拡散角	評価
A	R	10~800m	○	1.3mrad	
B	R	2~400m	○	3mrad	
C	T	1200m	○	0.3mrad	○
D	T	120m		0.6mrad	
E	T	250m		0.3mrad	○
F	N	100~400m	○	0.6mrad	



写真-4 3D レーザスカナー(左)、ノンプリズムレーザ式 TS (右)

3. 評価実験

調査により、ノンプリズムレーザの機種を(写真-4)に示す二種類に絞り実験により評価した。

ノンプリズムレーザを人工干潟や人工海浜工事における汀線測量に用いる場合、測量対象物に対してレーザが斜めに当たるため、レーザの反射率の低下やスポット径の拡大による計測精度の低下が予測される。以下に、ノンプリズムレーザの測量精度低下要因を挙げる。

(1) ノンプリズムレーザの測量精度低下要因

- ①光源入射角が浅い ⇒ スポット径拡大、反射率低下
 - ②測量距離が遠い ⇒ スポット径拡大、光の大気吸収・屈折
 - ③対象物が黒い ⇒ 光が吸収される
 - ④水面 ⇒ 入射方向に光が反射しない
 - ⑤振動 ⇒ 高所作業車のゆれ
- 以上の要因の確認のため以下の実験を行なう。

(2) 実験により確認する検討項目

- ①3D レーザスキャナーとノンプリズムレーザ式 TS の比較
- ②ノンプリズムレーザの高さと、測量可能距離
- ③引き潮で濡れている砂面と海面の測位の可能性
- ④太陽光の影響と夜間測量の可能性
- ⑤海面の測量の可能性
- ⑥高所作業車のゆれ量の影響の調査

これらの実験を行なうことで、ノンプリズムレーザが汀線測量に適用可能か確認する。

3.1 3D レーザスキャナー

五洋建設株式会社技術研究所において、本館とピラミッドのモニュメントを 3D レーザスキャナーによって計測した、3D レーザスキャナーの仕様は以下のとおりである。

距離： 反射率 $\geq 80\%$ の自然物ターゲット 400m まで

反射率 $\geq 10\%$ の自然物ターゲット 120m まで

レーザ拡散角： 約 3mrad

3D レーザスキャナーを高所作業車へセットして 10m の高さで停止して、本館とピラミッドのモニュメントをスキャニングした。スキャニングした結果を図-10に示す。

計測時間は、数分間で終了する。図-10は写真のように見えるが、実際には、細かい測点の集合であり(X, Y, Z)の座標値をもち、各測点をレーザの反射強度に応じて色付けしたものである。

精度的には、これまで考察したとおりであるが、路面部などレーザが斜めに入射する部分では計測不能箇所やバラツキが 20~30cm と大きく、今回の人工干潟や人工海浜工事には適していないと判断される。しかし、レーザが直角へ入射可能な場所や、形状を 20~30cm の精度でよい場合には、高速で測れるなどの特長もあり、災害などの被害状況などの計測などには最適であると思われる。



写真-5 3D レーザスキャナー



写真-6 3D レーザスキャナー設置(高所作業車 10m)

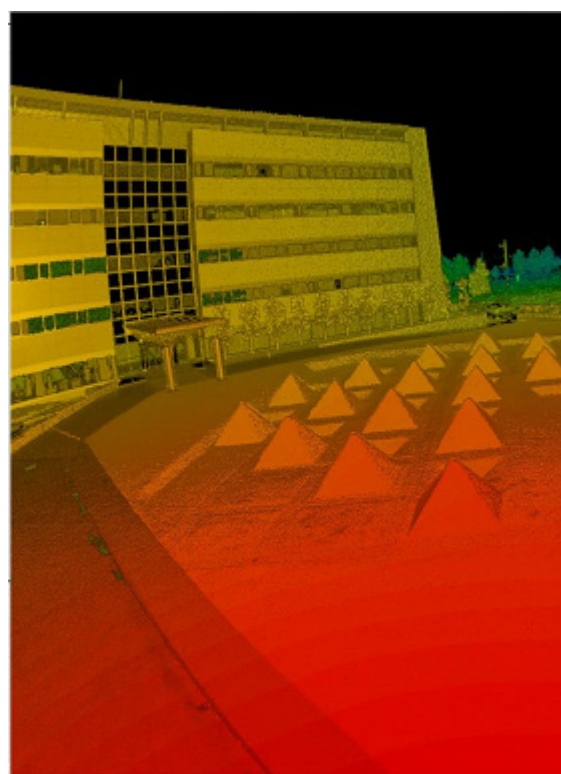


図-10 計測結果

3.2 ノンプリズムレーザ式 TS

3.2.1 五洋建設株式会社技術研究所での実験

実際の現場に持ち込む前に、事前調査として。五洋建設株式会社技術研究所において、屋外実験ヤードの砂山の計測をおこなった。ノンプリズムレーザ式 TS の仕様は以下のとおりである。

測角精度： 1 秒

測距範囲： プリズム 7000m

ノンプリズム 1200m

レーザ拡散角： 約 0.3mrad

高所作業車にノンプリズムレーザ式 TS を搭載して 10m の高さへ上げて(写真-7)、約 50m 先の砂山を計測した(写真-8)。その結果を図-11に示す。欠損もなく安定して計測できることがわかった。砂山の形状は事前に GPS で計測しており、その結果と比較したところ、その差は±10cm 程度に収まっていた。



写真-7 ノンプリズムレーザ式 TS 設置(高所作業車 10m)



写真-8 計測した砂山の形状

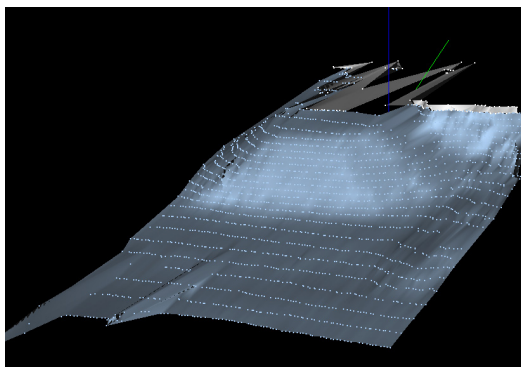


図-11 砂山の測量結果の三次元画像表示

3.2.2 平和島人工海浜測量実験

五洋建設株式会社技術研究所において、屋外実験ヤードの砂山の計測結果が良好であったので、実際の現場へ持ち込んで RTK-GPS 測量と精度比較した。

実験場所： 平和島人工海浜(東京都大田区)

海浜面積： 12ha

実験期間： 平成 17 年 1 月 19 日～1 月 20 日

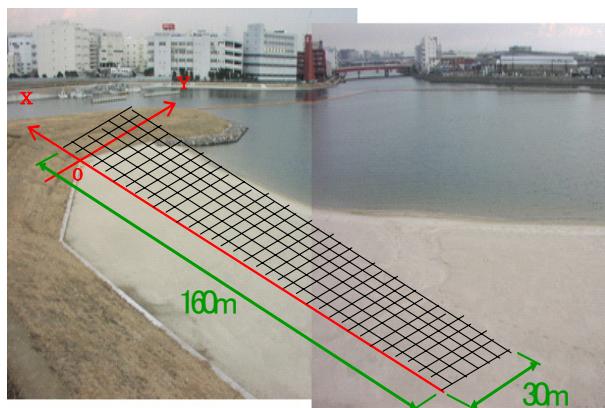


写真-9 平和島人工海浜測量実験



写真-10 平和島人工海浜ノンプリズムレーザ式 TS 配置

測量精度検証点は、写真-9に示すメッシュエリアを対象とし、人力方式で各測点へ RTK-GPS を移動して測量した。ノンプリズムレーザ式 TS は写真-10に示すように、高所作業車へ設置して 10m の高さまで上げた。ノンプリズムレーザ式 TS の測量方式は、測量機器本体の首を振りながら測量するため、円弧状となり測点の位置を一致させることができなかった。図-12に GPS とノンプリズム測量ポイント重ねた図を示す。上から下へ直線状に並んでいる測点が RTK-GPS によるもの、左の中から円弧状に並んだ測点はノンプリズムレーザ式 TS によるものである。

このように、測点を完全に一致させることができなかったため、GPS とノンプリズムの測量精度検証には、近接した測点を抽出して行う必要が生じた。現場は人工海浜であり、ある

程度平坦で、凹凸が小さいことを考慮して、両者の測点間距離約 1.5m 以内の点 (14 点) を測点として抽出して、その高さを比較した。以降、実験結果について述べる。

(1) 計測距離

50m～110m において計測可能であることが確認できた。

精度検証はできなかったものの、200m 先の測距も可能であった。

(2) 測量精度

図-13 に GPS とノンプリズムの測点間距離における誤差を示す。計測距離 50m～110m において、GPS 測量の高さに対して誤差は±20cm 以内であった。

- 平均誤差: 8cm
- 最大誤差: -20cm (計測距離 83m)
- 最小誤差: -2cm (計測距離 63m)

この結果を見る限りでは、GPS とノンプリズムレーザ式 TS の測点間距離が離れる程、高さ誤差が大きくなるという相関はない。

(3) 計測面

引き潮で濡れている砂面は計測可能であったが、海面の計測は不可能であった。

(4) 日照の影響と必要性

太陽光の影響はなく、夜間測量も可能であった。

(5) 高所作業車のゆれ量の影響

当日は、風はなかったが、ノンプリズムレーザ式 TS の操作のために人が乗っており、その動きによる振動の影響があり、ノンプリズムレーザ式 TS の傾斜の限界を超えて停止することがあった。今後は遠隔操作に改良したり、ロープ等で地上と固定する必要がある。

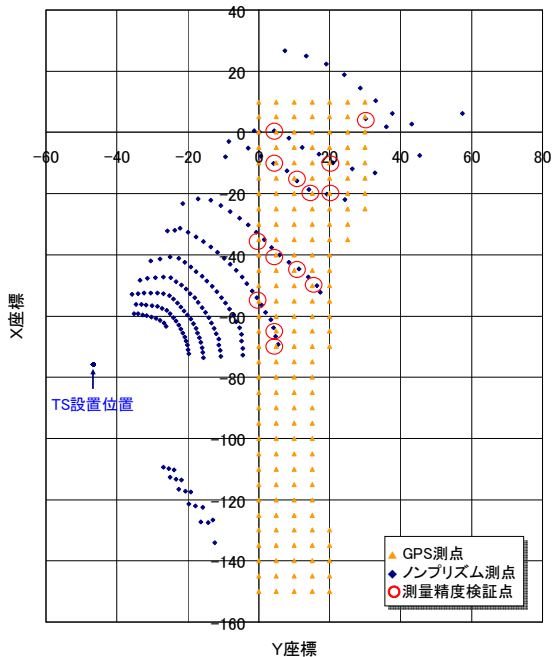


図-12 GPS とノンプリズムの測量ポイント

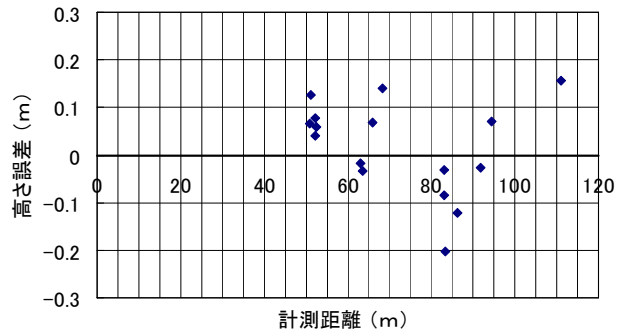


図-13 GPS とノンプリズムの測点間距離における誤差

4. おわりに

本実験結果を総括すると以下のとおりである。

- ①計測距離は、200m まで計測可能なが確認できたが、現在もノンプリズムレーザ式 TS は改良が行なわれており、距離の問題はクリアできると考えられる。
- ②精度について、高所作業車に操作員と一緒に乗ったため振動の影響がある。今後遠隔操作にすることで精度の向上が見込まれる。

また、今後の課題としては以下の 2 点が挙げられる。

- ①人工干潟を想定した波打ち際 (水分を多く含む土) での精度を確認する必要がある。
- ②格子状座標点の測量に対応したハード・ソフトの開発などが必要である。

現時点においては、ノンプリズムレーザ式 TS を人工干潟や人工海浜工事の完成時出来形管理へ直ぐに適用することは精度的に困難であるが、施工管理には適用可能と考えられる。本技術の更なる発展に期待したい。

【参考文献】

- 1) 重松文治・佐田達典: GPS の解説、GPS フロンティア、日本測量協会、2004.
- 2) 土屋淳・辻宏道: 新・GPS 測量の基礎、日本測量協会、2002.
- 3) 飯村友三郎・中根勝見・箱岩英一: TS・GPS による基準点測量、東洋書店、1998.
- 4) 渡邊文男・町田晃一: 写真測量・応用測量、オーム社、2000.

【謝辞】

今回の平和島人工海浜測量実験にあたり、有明工事事務所に多大なご協力をいただきましたことを、紙面を借りてお礼申し上げます。