

ハンディGPSを用いた海岸地形測量法の開発

田中 龍児¹・西 隆一郎²・長山 昭夫³

¹正会員 博(工) 第一工業大学准教授 工学部 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)
E-mail: r-tanaka@daiichi-koudai.ac.jp

²正会員 博(工) 鹿児島大学教授 水産学部 (〒890-0056 鹿児島市下荒田4-50-20)
E-mail: nishi24@fish.kagoshima-u.ac.jp

³正会員 博(工) 鹿児島工業高等専門学校 技術室 (〒899-5193 鹿児島県霧島市隼人町真孝1460-1)
E-mail: nagayama@kagoshima-ct.ac.jp

空中写真測量や航空レーザ測量を実施するには狭く、トータルステーション等による地上測量には広すぎるような範囲での陸域部の海岸地形測量を、ハンディGPSを用いて高密度にかつ迅速に測量する技術の開発を行った。DGPS補正を行うと、一般にいわれる単独測位の誤差10mよりもはるかに小さく、固定局と移動局の差を取ったことにより、電離層や大気中の電波遅延の誤差が除去されていることが確認された。さらに、3次元アフィン変換を施した結果、地図情報レベル2500程度(相当縮尺1/2,500)の精度の地形測量を、簡単に、高密度に、かつ迅速に行うことができた。調整された点群データはGISで処理し、地形図作成の自動化についても検討した。なお、一連のデータ処理はWEBプログラムを作成し、いつでも、どこでも、誰でも利用できる環境を構築した。

Key Words : topographical survey, handy gps, differential gps, affine transformation

1. はじめに

海岸侵食は全国的な問題であり、鹿児島県薩摩半島の西岸、東シナ海に面する九州最大の砂丘海岸である吹上浜においても、一部で侵食が進み¹⁾、海岸域の土砂管理や漂砂機構の解明が必要である。一つの漂砂系全域は一般に延長が数kmから数十kmと広範囲に及ぶため、漂砂減少や海岸過程把握のためには標高が水面より高い陸域部は空中写真測量や航空レーザ測量が望ましく、水面下は2色の航空レーザ測深システム²⁾やマルチナロービーム測深システム³⁾などの使用が望ましいが、コスト面などの制約で数ヶ月単位での繰り返し測量は難しい。

そこで本研究では、空中写真測量や航空レーザ測量を実施するには狭く、トータルステーション(以下、TS)等による地上測量には広すぎるような範囲での陸域部の海岸地形測量を、ハンディGPSを用いて迅速かつ高密度に測量する技術の開発を試みる。ハンディGPSの測位方式は単独測位で、一般に計測誤差が大きく、そのまま測量に用いるには精度が不足するが、最近では安価な機種でも水平位置計測精度3~4mという高感度な機種も市販されている⁴⁾ことから、複数のハンディGPSで計測し、DGPSと類似の原理で補正計算を行ない、さらに3次元のアフィン変換を施し、地図情報レベル2500程度

(相当縮尺1/2,500)の精度の地形測量を迅速に行うことを検討した。また、一連のデータ処理を実行できるWEBシステムを構築し、いつでも、どこでも、誰でも利用できるようにした。

2. 計測および計算処理方法

本研究で用いたハンディGPSは、水平位置の最小目盛は0.01秒で距離にすると約0.3m、標高の最小目盛は0.1mである。この程度の精度があればそのままでもレベル1000程度(相当縮尺1/1,000)の測量には十分使用できるが、実際は電波遅延等の影響で、大きな計測誤差となる。特に標高については、ジオイド高補正を行っていないため誤差が大きい。しかしながら、図-1に示すようにGPSの測位方式には他に相対測位があり、その中で、ディファレンシャル測位(Differential GPS, 以下DGPS)は図-2のように、測位対象となる移動局の他に、位置のわかっている固定局でGPS電波を受信し、対流圏の影響、電離層の影響等の誤差を相殺する方法⁵⁾である。通常は、既知点に置かれた固定局受信機における各衛星の測定値をリアルタイムに移動局へ伝送するが、本研究では式(1)のように後処理で補正計算を行なった。

$$\begin{aligned}
 (\text{移動局の決定座標}) &= (\text{移動局の計測座標}) \\
 &- (\text{固定局の計測座標}) \quad (1) \\
 &+ (\text{固定局の基準点座標})
 \end{aligned}$$

さらに精度向上のために、標定点に基づいて式(2)に示す3次元のアフィン変換により幾何補正した。


$$(X \ Y \ Z \ 1) = (x \ y \ z \ 1) \begin{pmatrix} a & b & c & 0 \\ d & e & f & 0 \\ g & h & i & 0 \\ j & k & l & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 x, y, z は変換前、 X, Y, Z は変換後の座標値。 $a \sim l$ は変換パラメータである。

変換パラメータは対応する4点の計測値があれば求められるが、4点より多い場合、すなわち過剰観測の場合は、最小二乗法を適用し繰り返し逐次計算する。

最小二乗法を用いる一般化されたアフィン変換は、テイラー展開で線形化されているので、初期値が大きくと外れると、良い結果が得られない。本研究では10回の計算の中で、標定点との誤差が最小となる時のパラメータを用いた。なお、繰り返し回数については100回程度の繰り返し計算も実行してみたが、ほとんど変化がなかった。

計測および計算処理の手順を次に示す。

1. 計測に使用するハンディ GPS を基準点上で約10分間置き受信状態が安定するまで待つ。データ取得間隔を1秒とし、気圧補正機能がある機種では基準点の標高を入力する。
2. 固定局用のハンディ GPS は、あらかじめ設置した基準点の上に置いてログを記録する。
3. 地形観測用(移動局)のハンディ GPS は、 のよ

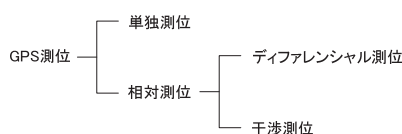


図-1 GPS測位の種類

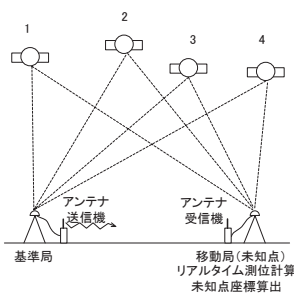


図-2 一般のディファレンシャル測位

うにハンディ GPS を2 mのポールに受信機を取り付けて、地面より約0.3 m持ち上げて保持し、ゆっくり歩きながら、トラックポイントデータ(緯度、経度、標高、時刻)を計測する。また標定点となる杭上では約1分間静止し計測する。ハンディ GPS を2 mのポールに取り付けるのは、人体やその他の地物による電波障害を避けるためである。

4. 計測作業終了後、計測されたデータをパソコンにダウンロードし、移動局のデータから、標定点ではポール高2.0 m、それ以外の点では2.3 mを減じ、同時刻に計測された移動局の座標値から固定局の座標値を差し引き、基準点座標値を加える(WEBシステムで処理)。
5. さらに3次元のアフィン変換を施し、調整された点群データを取得する(これもWEBシステムで処理)。
6. 以上により得られたデータをGISソフトやCADソフトに取り込み、等高線や断面図を描画する。

3. WEBシステムの構築

受信機よりダウンロードしたデータは、1秒ごとに、番号、緯度、経度、標高、時刻等が記録されており、データ数は1時間前後の計測でも数千点になる(10,000点以上は、サーバ処理の関係でタイムアウトになる)ので、誤差調整のためにWEBシステムを構築した。

既知点との整合を図る方法として、アフィン変換、ヘルマート変換、平行移動、重み変換などが考えられるが、それぞれの座標変換方法において大きな差は認められないという報告⁶⁾もある。本システムは標定点が4点以上の場合について3次元アフィン変換を施すが、標定点が5点以上の場合には、パラメータの初期値に補正を加えながら10回繰り返し計算し、標定点の座標と変換後の座標差が最小となる時のパラメータを用いて変換する。



図-3 計測風景

図-4に本WEBシステムの流れを示すが、アフィン変換の処理の流れとしては、(i)緯度、経度を平面直角座標に変換 (ii)式(1)により、移動局の計測座標を決定 (iii)標定点の座標を入力し、移動局の座標の中で、標定点の座標に近いものを自動で検索 (iv)アフィン変換のパラメータ計算 (v)アフィン変換 の順で処理する。

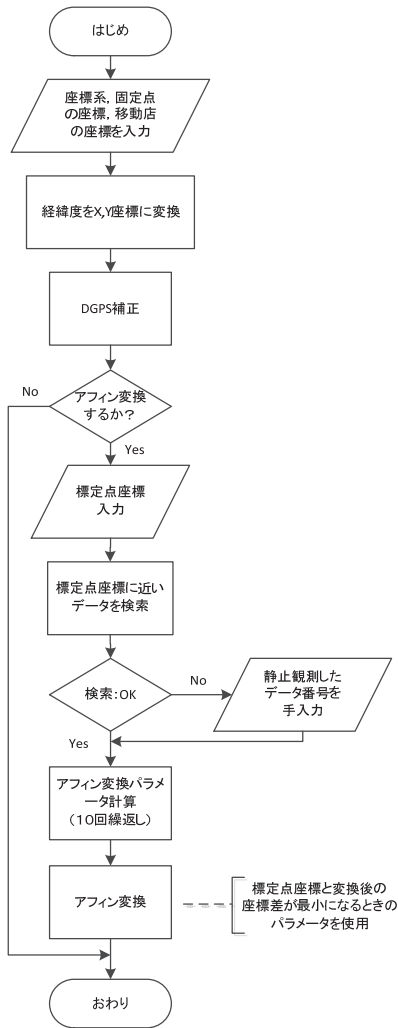


図-4 WEB システムの流れ

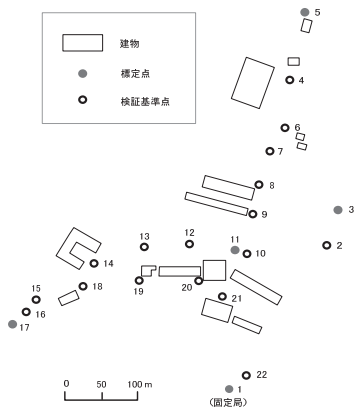


図-5 基準点の配置

4. 精度検証

本研究の有効性を検討するために、既設の3級・4級基準点上で計測し、精度を検証した。図-5は基準点配置図であるが、点1は固定局であり、ハンディGPSを2mポールに取り付けて計測した。他の点では移動局として約1分間静止して計測した。付近には3階以上の建物や電波障害となりそうな建造物が存在した。なお、GPS衛星飛来予測プログラムによる観測時間帯午前9:00~12:00の衛星捕捉数(図-6)は7個以上、精度低下率(DOP:dilution of precision)(図-7)は4以下で受信状況は良好であった。

図-8と図-9は、それぞれ移動局から固定局の計測データを差し引き、固定局の座標値を加えたDGPS補正と、さらに、点番号1, 3, 5, 11, 17の5点を標定点として、3次元のアフィン変換を施した場合の水平位置の誤差と標高の誤差の比較である。DGPS補正を施した段階で基準点とのずれの最大値は、水平位置4.0m、標高2.8mで、3次元のアフィン変換後のずれの最大値は、水平位置4.1m、標高2.0m、平均偏差は、水平位置1.4m、標高0.5mであった。DGPS補正の段階でも、一般にいわれる単独測位の誤差10mよりもはるかに小さく、固定局と移動局の差を取ったことにより、電離層や大気中の電波遅延の誤差が除去されていることが確認された。

水平位置、標高とも誤差の大きい点は建物の傍の点であり、受信状態が悪かったためと考えられる。また、アフィン変換を施すと、ほとんどの点において誤差は小さくなっているが、DGPS補正の段階で誤差が大きかった点の近傍では、逆に誤差が増大しているところもある。

また、標高精度が水平位置精度よりも良くなっているが、本研究では気圧補正機能付の機種を使用したためであると考えられる。

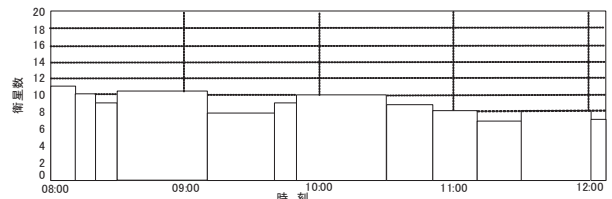


図-6 観測時間帯の衛星捕捉数

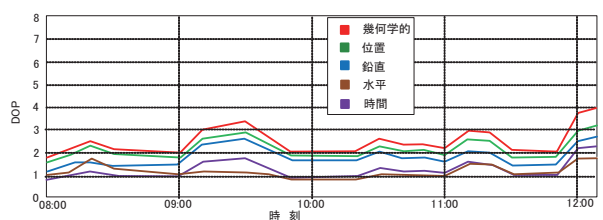


図-7 観測時間帯のDOP

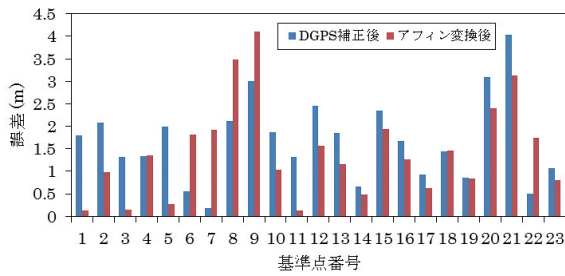


図-8 水平位置誤差の比較

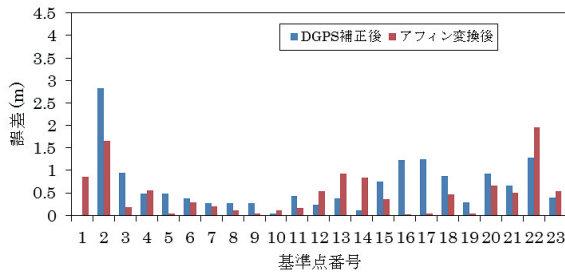


図-9 標高誤差の比較

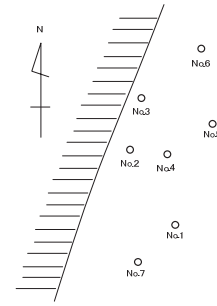


図-10 標定点の配置

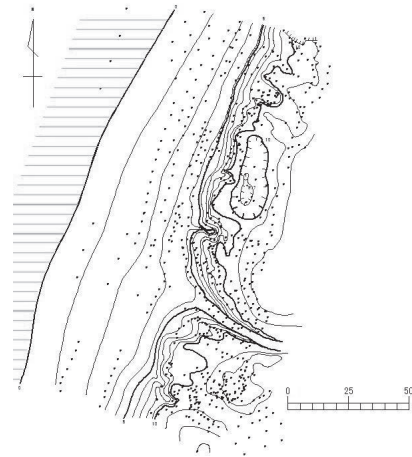


図-11 TSによる地形測量

5. 海岸域での計測

計測地域の面積は約 25,000 m² (100 m×250 m) で、周囲には地形的な凹地以外の電波障害となるような地物はなく、観測時間帯午前 9:00~12:00 の衛星捕捉数は 7 個以上、DOP も 4 以下で受信状況は良好であった。

予め TS により図-10 のように標定点 7 点を設置し、ハンディ GPS の精度を検証するために TS による地形測量を実施した (約 700 点)。地形測量では観測者とミラーマン 2 名で、傾斜変換点など地形の変化点を中心に観測し、所要時間は約 16 時間であった。図-11 は TS で観測した点と CAD で描画した 1 m 間隔の等高線である。

図-12 は 1 秒ごとに計測したデータをパソコンにダウンロードし表示した足跡 (約 12,100 点) である。計測の際は、ほぼ 1 m 間隔になるように歩き、TS による地形測量と同じように、傾斜変換点は必ず通過するようにした。凹凸部分では螺旋状に歩き、平坦地ではジグザグに歩いて計測した。また、標定点の杭上では直接ポールを立て 1 分間静止計測した。計測には 2 台の移動局を用い、約 2 時間を要した。

データダウンロードおよび軌跡の表示には、フリーソフトのカシミール 3D を使用し、このムービー機能により標定点杭上に静止したデータを判別し取得した。

その結果、DGPS 補正を施した段階で基準点とのずれの最大値は、水平位置 2.9 m、標高 2.0 m で、3次元のアフィン変換後のずれの最大値は、水平位置 2.4 m、標



図-12 計測の足跡

高 1.1 m、平均偏差は、水平位置 1.3 m、標高 0.7 m であった。

図-13 はハンディ GPS の補正後のデータより GIS で TIN (triangulated irregular network) を作成し、等高線を出力したものである。図-14 は計測点を 1/10 程度に間引いた後、CAD で描画した 1 m 間隔の等高線である。また、図-15 は GIS で作成した 3D 地形図である。



図-13 GISで出力した等高線

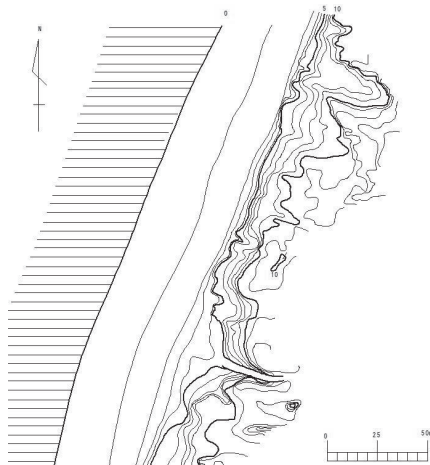


図-14 CADで仕上げた等高線

6. 結論

本研究では高価な測量器械を使用せず、登山などアウトドアスポーツ用として使われているハンディGPSをポールに取り付けて歩き回って計測するというユニークな測量法の開発を行った。その結果、電波障害のない海岸域では、水平位置、標高とも平均2m前後の誤差で計測できることが確認された。

本研究のポイントは、(1)比較的広い範囲の測量を安価・迅速に実施 (2)ハンディGPSによる計測誤差の低減(DGPS補正, 3次元アフィン変換) (3)レーザ測量やデジタル写真測量で得られるような高密度点群データの取得でGISによる3D地形出力 (4)いつでも、どこでも、誰でも利用できるWEBシステムの開発である。

(1)については、海岸地形だけでなく、緊急性を要するような災害地の大きな地形を把握する技術としても有効と考えられる。迅速性については、TSによる地形測量では測量技術者の熟練度によるので、単純に比較はで

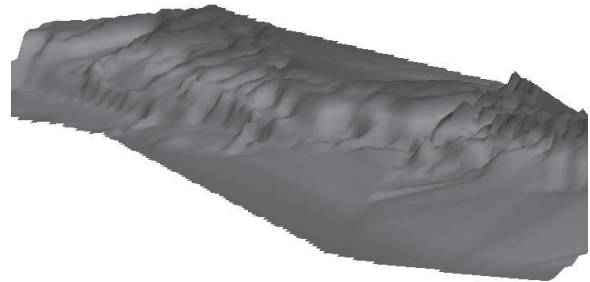


図-15 3D地形図

表-1 公共測量作業規程準則の位置精度

| 縮尺 | 水平位置標準偏差 | 標高点標準偏差 |
|---------|----------|---------|
| 1/1,000 | 0.70m以内 | 0.33m以内 |
| 1/2,500 | 1.75m以内 | 0.66m以内 |
| 1/5,000 | 3.50m以内 | 1.66m以内 |

表-2 本研究の計測精度

| | 水平位置 (m) | | 標高 (m) | |
|---------|----------|------|--------|------|
| | 最大誤差 | 平均偏差 | 最大誤差 | 平均偏差 |
| DGPS補正後 | 2.9 | 1.3 | 2.0 | 1.0 |
| アフィン変換後 | 2.4 | 1.3 | 1.1 | 0.7 |

きないが、所要時間だけから見ると明らかにハンディGPSの方が速かった(約4倍)。また公共測量作業規程準則⁷⁾(表-1)に規定されている1/2,500の精度は、水平位置の標準偏差1.75m以内、標高点の標準偏差0.66m以内となっており、本研究(表-2)のアフィン変換後の平均偏差はこれを満たしているが、水平位置の最大のずれが3m近くになることもあり、今後の検討課題である。

(2)については本研究でその有効性が示された。(3)については、1秒ごとに取得した座標を点群データとして利用した。これにより微細な地形変化の把握が可能になる。ただし、計測中の予期しない電波障害等により極端な精度低下の問題が残っているが、これについては電波状態の確認のために、手元に確認用のハンディGPSを持ち、確認しながら計測する方法等が考えられる。(4)については、標定点が3点以下の場合にも対応させるなど、まだ改良すべき点はあるが、地理空間情報をいつでも、どこでも、誰でも活用できる一つの手法として提案する。

以上の結果より、本研究の測量法は将来的に国産の準天頂衛星が完備される予定であることや、高感度ハンディGPSの登場により、安価に迅速に高密度な地形測量を可能にするものと期待される。

謝辞：本研究は公益財団法人鹿児島県建設技術センター平成24年度地域づくり助成事業(鹿建技第36号)の助成を受けて実施しました。記して、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 西隆一郎ほか：吹上浜海岸における汀線と海岸植生および砂丘林境界の長期変動特性，海岸工学論文集，第45巻，pp. 661-665, 1988.
- 2) 戸澤実，松本良浩，岩本暢之，小野智三，矢島広樹：航空レーザ測深機のテスト飛行について，海洋情報部技報，第22巻，pp.1-6, 2004.
- 3) 森弘和，井上渉，本間章禎：新型浅海用マルチビーム測深機(SEABAT 7101)導入について，海洋情報部技報，第46巻，pp.69-77, 2010.
- 4) 高野真一，平山哲也，小高祐樹，樋口政和，村上仁己：複数GPS端末の誤差特性とその評価，成蹊大学理工学研究報告，第48巻，pp.51-61, 2011.
- 5) 松山孝彦，門倉 翠，八釜和紀：ポータブルGPS受信機によるDGPS測位評価，神戸市立工業高等専門学校研究紀要38(2), pp.51-54, 2000.
- 6) 鈴木 実，松田雅志：ネットワーク型RTK-GPS測定の標準化に関する調査研究作業（地形・応用測量），国土地理院GPS測位技術の標準化検討委員会調査研究報告，2004.
- 7) 国土交通省：公共測量作業規程の準則，2010年度改訂版.

DEVELOPMENT OF COASTAL ZONE SURVEY TECHNIQUES USING HANDY GPS

Ryoji TANAKA, Ryuichiro NISHI and Akiyo NAGAYAMA

Coastal zone mapping technics using commercial handy GPSs is developed and applied to survey an area that is too small to apply an airborne laser survey system or aerial photograph survey and too large to apply a Total Station survey. A quasi DGPS correction method is applied to reduce a survey error and three dimensional affine transformation is applied to original GPS data set (horizontal x, y and vertical z data). As a result, reasonably accurate topography data set which is equivalent to mapping information level 2500 (reference scale 1/2,500), can be achieved. Then, transformed data set is processed by GIS software to draw a topography map. This data process operation is now web-based and can be applied by anybody.