

## 簡易 GPS の機能試験及び地形計測試験

Examination on the Functions of Simple GPS and Experiment of the Landform Measuring by it

黒木 貴一

Takahito KUROKI  
(社会科教育講座)

宗 建 郎

Tatsuroh SOH  
(志學館大学)

磯 望

Nozomi ISO  
(西南学院大学)

黒田 圭介

Keisuke KURODA  
(西南学院大学)

(平成25年9月30日受理)

### 要 旨

廉価な簡易 GPS の機材特性を様々な計測試験を通じて確認し, DEM 作成を通じて地形計測への適用性を評価した。記録計測は結果座標の安定する計測開始約 10 分後からが良いが, その場合でも単独計測の結果は, 実際の座標に対し XY 座標には数 m, Z 座標には 10 m 以上もの差が生じる。市街地では特に差が大きく出やすいため, 適用場所は天空率の高いことが望ましい。移動計測は, 速度を一定に保つ緩徒歩で実施する方が良く, その際向きは固定して機材保持すると良い結果が得られる。機材毎に計測座標に差が認められるが, 各機材の座標変化傾向が似通っており, 機材間の計測差と座標変化を補正し計測精度を上げることができる。さらに始点と終点を基準点に対応付け, 始点と終点間の計測点の座標はトラバース測量の様式で経路距離の補正を実施すれば, 計測精度を向上させられる。地形計測への適用性は, 試験範囲に基準点を 1 つ設置する場合と, 試験範囲に複数の基準点を設置する場合で確認した。前者は海岸地形での移動計測結果に対し, 基準点对応の計測結果を基準点座標へ補正し, 加えて時間経過による座標変化の補正を加えた。後者は河岸地形での移動計測結果に対し, XY 座標は開始点と終点の基準点座標へ補正し, Z 座標にはそれに時間経過による座標変化の補正を加えた。結果, 両者とも現実的な地形起伏をよく捉えられたことが分かった。

キーワード: 簡易 GPS, GPS 計測, GIS, 地形

### I. はじめに

DEM(Digital Elevation Model) は, 地形図の等高線や航空レーザー測量等により得た標高データから作成された地形標高モデルである。DEM は画像処理を施すことで地形・地質を詳細に判読できる<sup>1), 2), 3)</sup> ため, 事業や研究に利用頻度が

増した。現在, 基盤地図情報の 5 m メッシュの DEM が無償提供されているが, 都市部や一級河川沿いに範囲が限られており, 更新が無い場合, 災害等による地形変化解析に十分な利用効果を期待できない。また独自に詳細な DEM を準備するには費用がかかる。そのため高さを計測可能

な簡易レーザー距離計を利用し、現地で廉価に迅速にDEMを作成する手法開発が最近進められた<sup>4), 5), 6)</sup>。

ところでDEMを作成するための座標取得にはGPS計測も考えられる。例えば、人工衛星データからDEMを作成する際に基準点座標をGPS計測で取得することが実施される<sup>7), 8)</sup>。ただこの様な計測に使用されるGPS機材は1式100万円以上を要し高価である。しかし移動、登山、観光等で位置確認に使用される簡易GPSは10万円以下で多くの機種が販売されている。また計測データの蓄積に特化した廉価なデータロガーも今日ある。最近では無料のGPSアプリも利用できる。

簡易GPSによる単独計測では、例えばEMPEX社のポケナビMount Miniは、水平方向で15mRMS（正確な位置を中心として半径15mの球の中に誤差が収まる確率が68%）、高さ方向で70mRMSであり、特に高さ方向の座標取得は難しいとされる。そのため耕作地特定に10m程度の誤差でよい単独計測を試験した報告<sup>9)</sup>の様な研究がある。一方で厳密な測量業務ではGPS計測精度を高める工夫が求められ、各種の相対測位が実施される<sup>10)</sup>。たとえば森林内で有効な相対測位方法を検討した報告<sup>11)</sup>がある。ただいずれも水平方向精度に基づく現場適用試験である。そして弱点となる高さ方向のGPS測量精度を高めるために、相対測位にレーザー計測を組み合わせた現場適用事例の紹介が多い<sup>12), 13), 14), 15)</sup>。つまり高さ方向の測量には、相応の工夫が求められる。いずれにしても現在のGPS測量は測量精度を上げるため相対測位のRTK(Real Time Kinematic)測量によるものが主流となっており、既に簡易GPSを用いたRTK測量の連続計測による精度検証報告もなされた<sup>16)</sup>。そしてRTK測量による連続計測から詳細DEM作成の事例報告もある<sup>17)</sup>。

そこで本研究では一般レジャー用の、さらに廉価な簡易GPSによる連続計測から、どの程度の精度で座標取得が可能かを確認する。そして可能な限り計測精度を向上させる実用的な計測方法を検討し、実際に地形分析が可能なDEMが取得可能かどうかを確認した。

## II. 機能試験方法

### 1. 座標計測特性の基礎的試験

西南学院大学キャンパスにて2012年10月18日に実施した。約¥8000で購入でき、ロガー機能を持ち、単三電池1本で作動する簡易GPSと

してM-241(HOLUX社)を利用した。XY座標データは経緯度で下6桁(約10cm間隔)まで、Z座標はメートルで下6桁まで取得され、結果はcsv形式やkmz形式でエクスポートできる。簡易GPSの3機(no.1から3)を地上設置し、10秒間隔で30分計測し記録した。no.1とno.3は任意の地点Aに、その約5m南にno.2を設置した(写真1)。

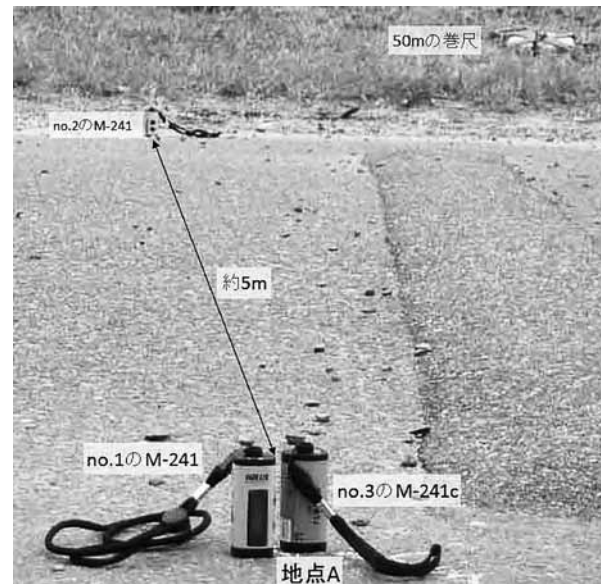


写真1 座標計測特性の基礎的試験の状況

### 2. 計測方法の基礎的試験

西南学院大学キャンパスにて2012年10月18日に実施した。地点Aにno.1から3を南向きで地上設置し、スイッチを入れ20分後から5秒間隔で記録を開始した。no.2は記録開始直前に約1m持ち上げ戻した後に記録を開始した。記録開始4分後にno.3のみ北向きに変えた。

### 3. 市街地での移動計測試験

西南学院大学キャンパスおよび周辺にて2012年10月25日に実施した。当該地は商業地と住宅地からなる市街地にあり、空が遮られ天空率が低い。また砂丘による数mの起伏もある。西南学院大学キャンパスにno.1を地上設置し、簡易GPSの2機(no.2と3)は移動させながら5秒間隔で計測し記録した。移動計測では、移動者が胸の位置(高さ約1m)にGPSを持ち、道路縁から1m程度離れて所定コースをたどる。この移動計測では比較のためにNaoki Kisara作成の無料のGPSアプリ(application software)「GPS

to PC」をインストールした携帯電話も用いた。移動計測の結果を GIS に投影し、基盤地図情報縮尺レベル 2500 の道路位置と比較し XY 座標の精度を確認する。移動計測の XY 座標に対する Z 座標を国土数値情報数値標高モデルの 5mDEM から求め、移動計測の Z 座標との差分から精度を確認する。

#### 4. 移動速度と標高差の影響試験

福岡教育大学キャンパスにて 2013 年 2 月 28 日に実施した。簡易 GPS の 1 機を頭の位置（高さ約 1.5 m）に持ち、坂道（写真 2）の坂上 A 点と坂下 B 点間（鉛直距離 6.3 m、水平距離 56.5 m で平滑な坂）を移動しながら 1 秒間隔で計測し記録した。約 3.5 km/h の緩徒歩で往復 5 回の計 10 回、約 4.9 km/h の普通徒歩で往復 1 回の計 2 回、約 7.2 km/h の小走りで往復 1 回の計 2 回、合計 14 回計測した。各計測間では約 1 分間停止した。結果を GIS に投影し、2500 分の 1 宗像市都市計画図の坂道位置と比較し XY 座標の精度を確認する。各回の計測経過時間に対する Z 座標をグラフ化し開始終了の標高差と実際の値とを比較し精度を確認する。各回の計測結果は A 点座標と A 点に対応する場所の計測座標との差分で補正する。



写真 2 移動速度と標高差の影響試験の状況

#### 5. 移動速度および遮蔽物の影響試験

福岡教育大学キャンパスにて 2013 年 3 月 4 日に実施した。簡易 GPS の 1 機を高さ約 1.5 m に持ち、水平なテニスコート（写真 3）の枠（23.8 m × 56.5 m）に沿って開始点から時計回りに移動しながら、1 秒間隔で計測し記録した。緩徒歩で 2 周、普通徒歩で 2 周、緩急徒歩で 2 周、小走りで 2 周の合計 8 回計測した。緩急徒歩は緩徒歩と普通徒

歩よりも速い急ぎ足との繰り返しで構成し、数秒で速やかな速度変化を心がける。各計測間は約 2 分間停止した。結果を GIS に投影し、2500 分の 1 宗像市都市計画図のテニスコートと比較し XY 座標の精度を確認する。計測経過時間に対する結果の Z 座標をグラフ化し結果の変化から精度を確認する。この際、テニスコート周囲の遮蔽物（地物や地形）の存在や計測条件に結果を対照し、天空率や加減速が結果に及ぼす影響を見る。



写真 3 移動速度および遮蔽物の影響試験の状況

#### 6. 移動速度および距離の影響試験

宮城県仙台平野の荒浜付近にて 2012 年 11 月 10 日に自動車にて実施した。簡易 GPS の 1 機を車窓外に手持し、海岸付近から内陸までの往復約 10 km を時速約 40 km の速度で移動しながら、1 秒間隔で計測し記録した。結果を GIS に投影し、基盤地図情報の数値標高モデルの 5mDEM による陰影図で XY 座標の精度を確認し、Z 座標の計測結果を XY 座標に対する 5mDEM の標高や始点の Z 座標と比較する。

### Ⅲ. 地形計測の適用試験方法

使用機材が簡易 GPS のため、古典的なキネマティック測量のストップアンドゴーないしは連続キネマティック<sup>10)</sup>を想定した計測方法を立案した。機能試験を通じて明らかにされる簡易 GPS の機材特性を考慮して、2 地区の試験範囲での地形計測を通じて DEM を作成し、地形をどの程度表現できるかを検証する。

#### 1. 仙台市における地形計測

仙台市荒浜付近（写真 4）にて 2012 年 11 月 10 日に実施した。簡易 GPS を 3 機（no.1 から 3）準備し、no.2 を始点 A 点に設置し固定点とし、



写真4 仙台市荒浜付近の状況



写真5 宮崎市高岡町の状況

no.1 と 3 の 2 機 で 移 動 計 測 す る 。 移 動 は 緩 徒 歩 と し、5 秒 間 隔 で 計 測 し 記 録 し た。固 定 点 の 計 測 結 果 か ら 平 均 座 標 値 を 求 め、5 秒 毎 の 各 計 測 結 果 に 対 し 平 均 座 標 値 か ら の 差 を 計 算 す る。移 動 計 測 の 始 点 に 対 応 す る 結 果 に 対 し 固 定 点 の 平 均 座 標 値 と の 差 を 補 正 す る。次 に 補 正 し た 移 動 計 測 の 結 果 を、対 応 す る 計 測 時 間 毎 に、固 定 点 の 各 計 測 結 果 に 対 す る 平 均 座 標 値 か ら の 差 で 補 正 す る。移 動 計 測 の 補 正 座 標 か ら 2mDEM を 作 成 す る。

## 2. 宮崎市における地形計測

宮崎市高岡町の大淀川河川敷(写真5)にて2013年3月8日に実施した。簡易GPSを2機(no.1と2)準備し、no.1を始点A点に設置し固定点とし、no.2で移動計測する。移動は緩徒歩とし、5秒間隔で計測し記録した。対象範囲内にA点以外に、終点C点、中間点Br1-7、Bl1-10の基準点を多数設置した。A点に対し、使用した簡易GPSの全測定データを平均し座標を定めた。他の基準点に対しては黒木ほか(2012)<sup>5)</sup>に示されたレーザー計測手法により座標を求めた。

各基準点間の移動計測点のXY座標は、計測開始時の座標と計測開始時に対応する基準点の座標との差を用いて仮XY座標に補正する。この仮XY座標は、計測終了時の仮座標と計測終了時に対応する基準点の座標との差を、計測開始の基準点からの移動距離で按分し補正する。これは2つの基準点間のトラバース補正に相当する。A点の計測結果から平均Z座標を求め、5秒毎の計測Z座標に対し平均Z座標との差を計算する。移動計測点のZ座標は、A点の平均Z座標との差を対応時刻毎に補正した上で、さらにXY座標と同じ手順で移動距離により補正する。さらにA点のXY座標に対応する基盤地図情報の5mDEM

の標高にZ座標を合わせる補正も今回加えた。最後に基準点の座標及び移動計測の補正座標から2mDEMを作成する。

## IV. 簡易GPSの機能試験結果と取扱い

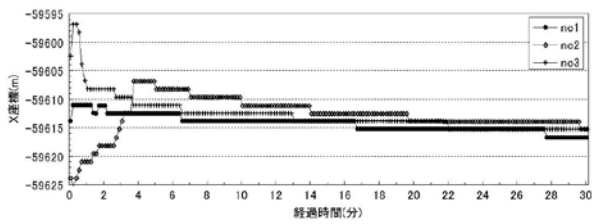
### 1. 座標計測特性の基礎的試験の結果

図1は簡易GPS3機による30分間の計測記録である。X座標は記録開始の約5分後に3機の値が急に近づき、約15分後以降は約1m程度の差に縮小した。各機材で見ると約5分経過後は変化が小さくなり、他機材との差はほぼ一定で推移する。Y座標は記録開始の約2分後に3機の値が急に近づき、約15分後以降は約1m程度のずれに縮小した。各機材で見ると約2分経過後は変化が小さくなり、他機材との差はほぼ一定で推移する。Z座標は記録開始の約5分後にそれぞれ時間経過に対し直線的に低下するようになった。このためno.2と3は約10mの差が30分間継続し、no.1と2は約20分後に値が一致しその後次第に乖離した。

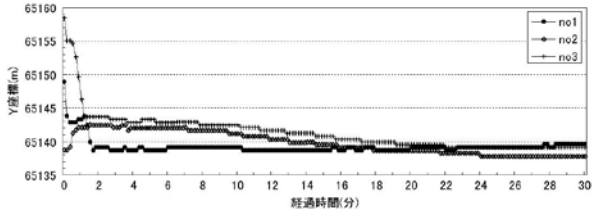
この試験から、計測された機材間のXY座標の差は約1mと小さいが、Z座標の差は約10mもあり大きい。XY座標は計測開始の約10分後から座標が安定し、Z座標は計測開始の約5分後から座標変化が安定することが分かった。なおZ座標は時間に対し機材毎に一定割合で変化する。

### 2. 計測方法の基礎的試験の結果

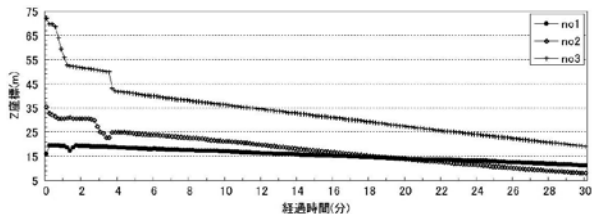
図2は簡易GPS3機による10分間の計測記録で、計測開始の約15分後に記録を開始した。X、Y、Z座標の変動は、図1に比べると明らかに小さく、安定した結果を得た。特にX座標は記録開始から最後までno.2と3が全く同じ値が継続し、no.1も約4分後から同じ値になり、値全体がよく安定



(1) X 座標



(2) Y 座標

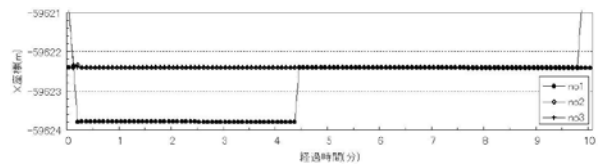


(3) Z 座標

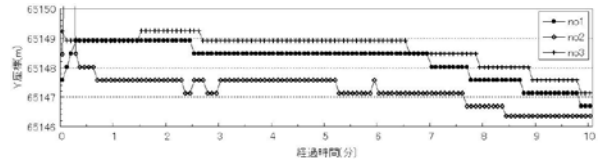
図 1 簡易 GPS3 機の同場所での計測結果

していた。Y 座標は 10 分間に 3 機とも約 2 m 下がるが、数分間の安定時間帯があった後に、段階的に約 50 cm 刻みで低下した。no.2 と 3 の値は約 1.5 m 差があり、no.1 の値は no.2 と 3 の間にある。3 機間の値差はほぼ一定であり、Y 座標の 3 本のグラフ線は平行を保ちつつ低下する。Z 座標は 10 分間に、no.1 と 2 は約 2 m 増加し、no.3 は約 3 m 増加した。no.1 と 2 は 4-5 分経過後から値の上昇率が低下したが、no.3 はさほど変化がない。機材による計測差は、X と Y 座標が約 2 m、Z 座標が 3 m 程度となった。この計測差は時間に対する変化が少ないため、座標は時間に対して一定割合で変化する傾向が明瞭である。これより、座標変化と機材による計測差を消去することにより、計測精度を高められる可能性がある。

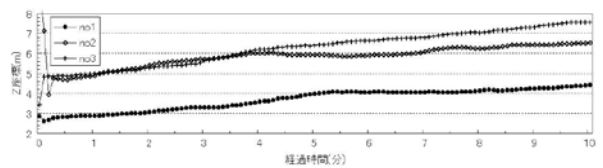
記録開始直後の no.2 の X, Y, Z 座標は他の機材に比べても大きく変動している。これは計測開始時に約 1 m 上下に動かしたこと以外に原因を考えにくい。no.3 の Z 座標の増加傾向が経過時間 4-5 分後に変化しない点は、他の機材と異なっている。これは、4 分後に no.3 のみ北向きに



(1) X 座標



(2) Y 座標



(3) Z 座標

図 2 同じ場所で条件変化を付けた計測結果

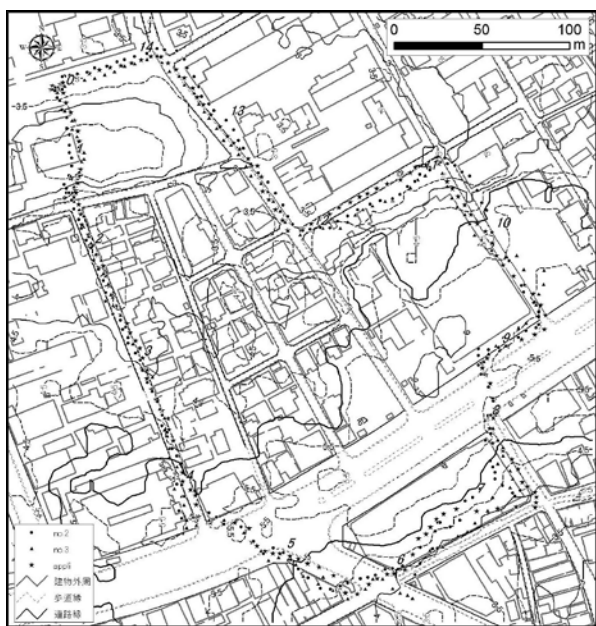
変えたこと以外に原因を考えにくい。

この試験から、簡易 GPS は時間による座標値の変動はあるが、機材が違っていても変動傾向は似通っており計測差が一定なので、座標変化と機材の計測差を消去することで、計測精度を高められると思われる。また、計測では機材向きを固定し機材は静穏に扱う必要のあることも分かった。

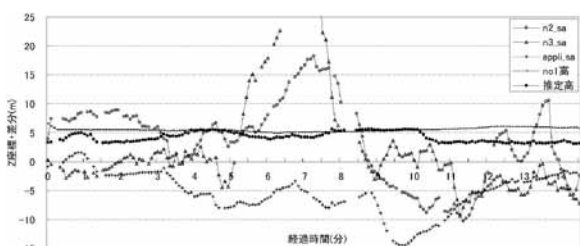
### 3. 市街地での移動計測試験の結果

図 3 (1) は no.2, no.3, GPS アプリによる市街地での移動計測による XY 座標の結果を基盤地図情報の建物、道路、標高による地図に示した。計測開始点の no.1 は標高約 3.5 m に設置され、その南約 300 m 付近は砂丘上にある幹線道路で標高約 5.5 m にある。計測は幹線道路の南側まで南下し反時計回りに歩き開始点に戻る。各機材の XY 座標凡例に開始からの経過時間 (分) を添えた。結果の大半は通過経路上に記録されたが、高層建物が近接する 4 分、5-8 分、9-12 分において、3 凡例のばらつきと経路からの乖離が約 10 m に及び大きい。それ以外の時間帯は、戸建て住宅のような低層建物の地域で、経路からの乖離は数 m 程度で小さい。なお無料の GPS アプリは、簡易 GPS と何ら遜色のない結果を得ている。

図 3 (2) は no.2, no.3, GPS アプリの XY 座標の基盤地図情報の標高と Z 座標計測結果との標高差を示す。参考に、計測開始点での Z 座標



(1) XY 座標

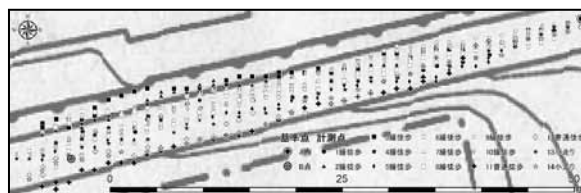


(2) Z 座標と XY 座標に対する標高

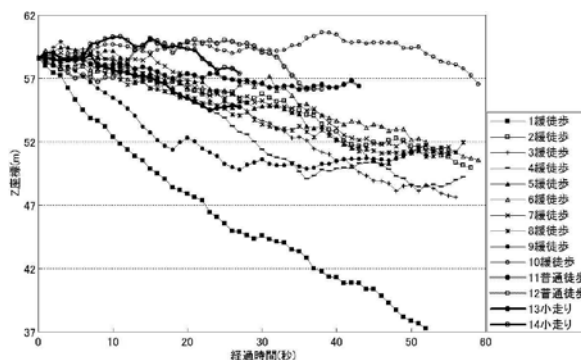
図 3 市街地での計測結果

計測結果と、3機の移動計測点の基盤地図情報から得た推定高を示した。移動3機は0分から3分と10分から最後まででは標高約3mに、3分から10分までは標高約5mに実際あった。これに対し固定のno.1は、標高約5-6mとされ1m以内の緩やかな変化を示した。一方、移動3機はno.1の経時変化、実際の標高変化をはるかに越える標高変化を示し、最大の標高差は+25m以上と約-15mにも及んだ。標高差の大きい時間帯は、機器毎に異なることもあるが、大きな標高差が共通する5-8分(3機)、9-11分(no.3以外)は、XY座標の乖離も大きかった。

したがって、市街地では簡易GPSの移動によるXY座標取得は低層建物地域では数m程度の差でできるが、高層建物地域では困難であり、一方Z座標はいずれの地域でも困難という事が分かった。



(1) XY 座標



(2) Z 座標

図 4 キャンパス内坂道での計測結果

#### 4. 移動速度と標高差の影響試験の結果

図 4 (1) は福岡教育大学キャンパスの坂道で実施した移動計測の結果から、XY座標で計測点を都市計画図の上に示した。B点に近づくほど経路からのずれは拡大し、B点に対応する終点では最大5m程度のずれを示した。ただこれらの結果のうち、緩徒歩での結果のずれは比較的小さく数mに収まっている。また各観測による経路は直線的に示されており、実際の経路に比べ不自然さはない。

図 4 (2) は同坂道の移動計測結果のうち経過時間に対するZ座標をグラフ化した。緩徒歩の場合、1緩徒歩(標高差21.3m)と10緩徒歩(標高差2.0m)を除けば、他8回の平均標高差は約8mであり、AB間の実際の標高差6.3mに近い。またA地点からB地点までのグラフはほぼ直線的で、時間に対する標高変化はほぼ一定である。これは水平距離に読み替えられる時間を横軸として、平滑な坂道形状と調和することを示す。一方、普通徒歩の場合、標高差は平均2.3mで、小走りの場合平均2.5mなので、実際の半分にも達しない。また両者のグラフには大きな凹凸があり、平滑な坂道形状もあまり表せない。

したがって、移動計測は緩徒歩で実施するのがよいと考えられる。さらに始点と終点に相当する計測結果のXYZ座標を、実際の座標との差分を利用し移動距離で補正すれば、始点と終点間の計

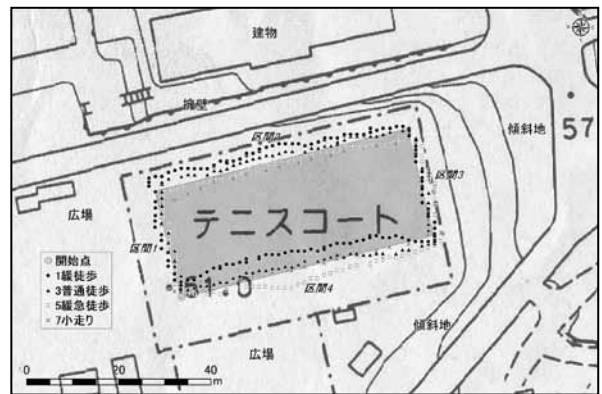


測点の座標精度は向上すると考えられる。なお3緩徒歩や5緩徒歩のA点付近、4緩徒歩や8緩徒歩のB点付近のZ座標で、その計測中に不自然な急上昇が見られるように、計測開始と終了間際に不自然な標高変化の記録されることが多かった。これは、移動計測での加減速が要因の可能性があり、次の実験で確認する。

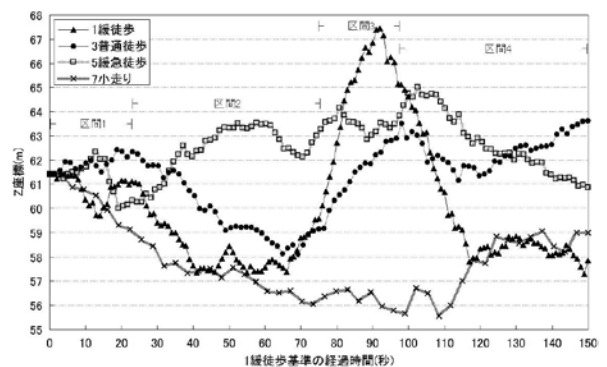
5. 移動速度および遮蔽物の影響試験の結果

図5(1)は福岡教育大学キャンパスのテニスコートで8回実施した移動計測結果のうち4回(1回目緩徒歩, 3回目普通徒歩, 5回目緩急徒歩, 7回目小走り)のXY座標で計測点を都市計画図の上に示した。区間1は四方が開けている。区間2は北に高さ6-7mの擁壁がある。区間3は東側が樹木に覆われた傾斜地と広場である。区間4は南側に樹木に覆われた傾斜地が少しある。南北方向の区間1と区間3では計測点は柵の数m以内にある。しかし東西方向の区間2と4では、計測点は最大約5m柵から離れた。3普通徒歩が柵に最も近い計測点を示した。1緩徒歩を南に数m, 5緩急徒歩を北に数m移動すれば3普通徒歩の計測点に近づく。区間1と区間3で東西ずれが少ないことを考えれば、区間2と4に大きい計測毎の南北のずれは、計測結果から開始点を認定する際に生じた誤りの可能性がある。ずれの理由がそうであれば、写真3及び図5(1)程度で示される障害物がある場合、簡易GPSによるXY座標取得は数mの精度で可能と思われる。これは市街地での移動観測試験の再確認である。

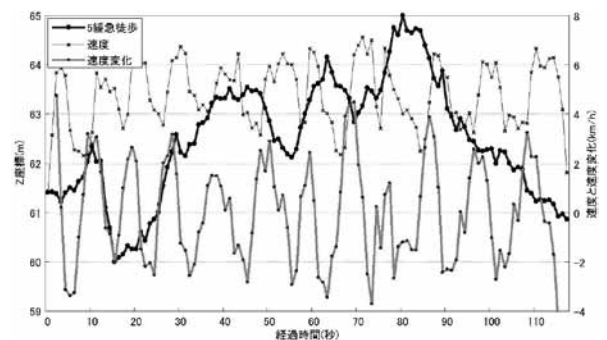
図5(2)は同コートの移動計測の結果のうち経過時間に対するZ座標をグラフ化した。実際は1緩徒歩が150秒, 3普通徒歩が104秒, 5緩急徒歩が117秒, 7小走りが47秒だった。それぞれ150秒要したとして1緩徒歩基準の経過時間に変換し、テニスコート周囲の障害物との位置関係を分かりやすくした。150秒とテニスコート柵(23.8m × 56.5m)を対照すると、区間1が0~22秒, 区間2が22~75秒, 区間3が75~97秒, 区間4が97~150秒に対応する。1緩徒歩及び3普通徒歩では、区間1は標高が安定する、区間2は標高が低下する、区間3はZ座標が急増する、区間4はZ座標が低下した後に安定するという傾向が共通している。また7小走りでは、区間1と区間2はZ座標が低下する、区間3はZ座標が安定する、区間4はZ座標が上昇した後に安定するという傾向がある。この様に区間ごとにZ座標の変化傾向を特徴づけられることが分かっ



(1) XY座標



(2) Z座標



(3) 移動速度とZ座標

図5 キャンパス内テニスコートでの計測結果

た。

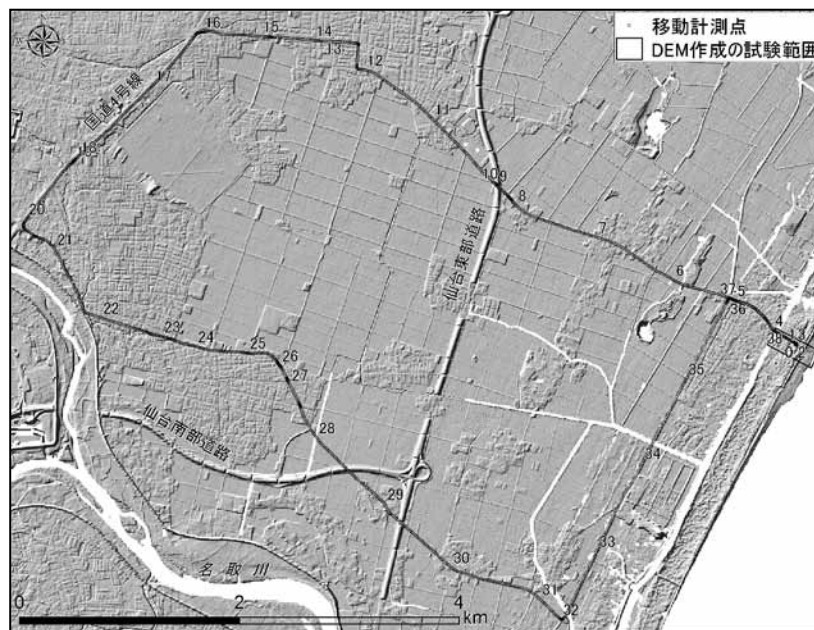
図5(3)により5緩急徒歩の経過時間に対するZ座標を移動速度と対照する。速度変化は5秒間の速度差である。40秒, 65秒, 80秒にZ座標が高まる時間がある。その時、速度はその前後に比べ低いように見える。20秒, 30秒, 55秒にZ座標が低まる時間がある。その時、速度はその前後に比べ高いように見える。Z座標の増減と速度の増減のタイミングは数秒ずれるように見え

る。40秒, 65秒, 80秒にZ座標が高まる時間では, 速度変化はその前後に比べ低い。20秒, 30秒, 55秒にZ座標が低まる時間では, 速度変化はその前後に比べやはり低いように見える。Z座標の増減と速度変化増減のタイミングはほぼ一致する。これより, 移動速度の急ぎ足(約7km/h)から緩徒歩(約3km/h)の数秒間の变化(加減速)がZ座標の計測精度の低下を招く可能性があることが分かった。

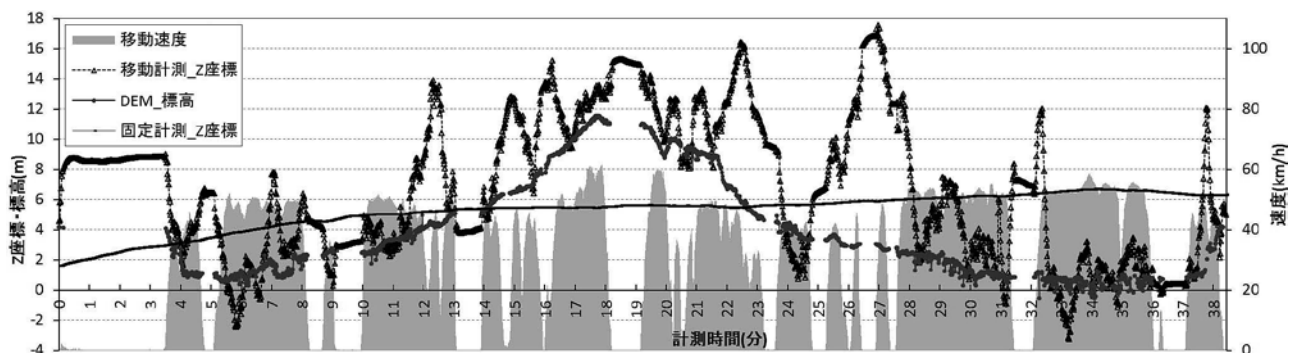
したがってZ座標は周囲の障害物の影響を確実に受けるため, Z座標の安定取得には区間1程度以上四方が開けている条件が必要であること, 移動計測時には安定した速度を維持する必要があることが分かった。

6. 移動速度および距離の影響試験の結果

図6(1)は仙台平野で実施した自動車による移動計測のXY座標の結果で計測点を陰影図の上に示した。数字は経過時間(分)を示す。仙台平野には海岸線に平行な複数の砂州・浜堤列が知られている<sup>18)</sup>。海岸線より1列目は4分と32分を結ぶ帯域, 2列目は7分と30分を結ぶ帯域, 3列目は9分と29分を結ぶ帯域, 4列目は15分から21分を結ぶ帯域である。3列目付近に仙台東部道路が南北に設置され, ジャンクションから仙台南部道路が西に延びる。4列目には国道4号線がある。南には名取川が流れ, その近傍では浜堤と自然堤防の区別がしにくい。このスケールで見ると, 計測点は道路を外れることはなく, 正確に移動経路を示している。



(1) XY座標



(2) Z座標・標高と移動速度

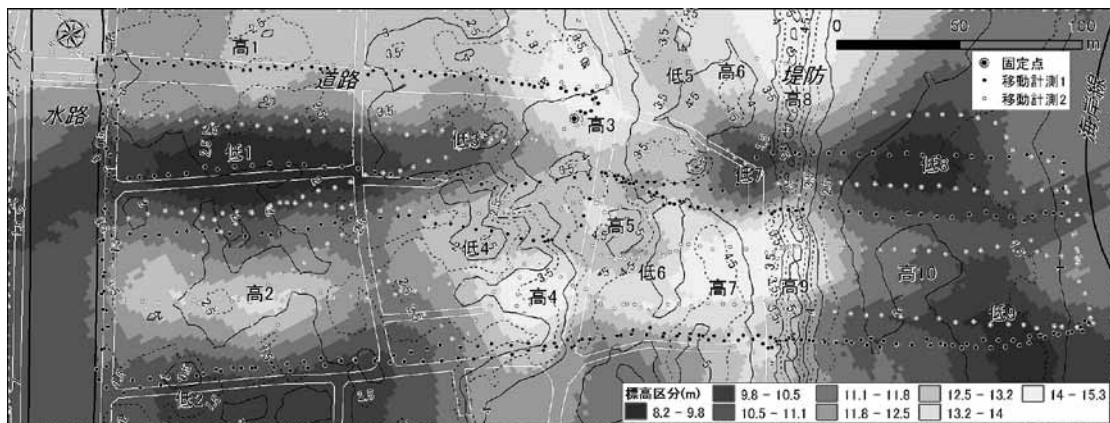
図6 自動車による仙台平野での計測結果



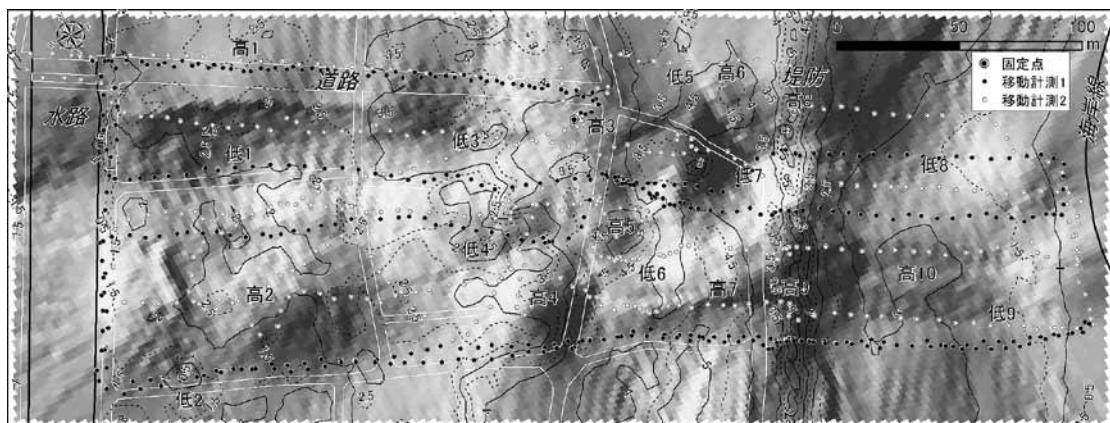
図6(2)は自動車による移動計測の結果のうち経過時間に対するZ座標、移動速度をグラフ化した。同時に、計測点に対する5mDEMでの標高と、始点で固定計測した簡易GPSの結果を付した。移動中の標高を確認する。始点は標高約4mにある。移動開始約5分で約0.5mまで標高低下した後、標高は次第に増加し国道4号線通過中の約18分で約11mに達する。国道4号線から左折する約20分以降、標高は次第に低下し、北へ移動を始めた約33分以降はマイナス標高も含み約0.2mの低標高で推移する。始点に近づく約37分以降は標高が増加し約4mにまで到達する。移動計測によるZ座標のグラフには、地形の標高変化に対し5mを越す増減の繰り返しによる凹凸が多い。始点の固定計測のZ座標は約2mから約6mまで緩やかに増加するため、この凹凸はGPS衛星の配置の問題ではない。ここで移動計測のZ座標グラフの凹部に相当する基底

付近に注目すると、5mDEMでの標高変化を差1m前後で再現できており、現実的な標高が計測できているように思われる。そこで問題は上に凸となる理由である。移動計測のZ座標のグラフと移動速度とを対照する。移動速度が0になる信号停車中の5分、12分、16分、18-9分、23分、26-7分、32分頃に、Z座標グラフの凸部が対応する。これは加速するとZ座標が低下し、減速すると増加することを示す。すべての加減速がZ座標グラフの凹凸として表れない要因には、加減速程度と加減速に対する簡易GPSの感度との兼ね合いがあると考えられる。

したがって、自動車での移動計測では、XY座標は道路上を示す数m精度の取得が可能である。Z座標は条件が良ければ標高差1m前後で取得できるが、加減速により5mを越す異常値を示す。この時、加速するとZ座標が低下し、減速すると増加した。



(1) 結果DEMと基盤地図情報の標高



(2) 結果陰影と基盤地図情報の標高

図7 仙台平野での緩徒歩による移動計測結果

## V. 地形計測試験の結果と考察

### 1. 仙台平野の海岸で試験と検証

図7は図6(1)の東部の試験範囲で作成した2mDEMによる標高区分及びその陰影である。それぞれ基盤地図情報の5mDEMによる0.5m間隔等高線と基盤地図情報の海岸線、水涯線、道路緑線を重ねた。さらに固定点及び移動計測1と2のXY座標による位置を示した。試験範囲には、東は海岸線、西は水路、海岸線より100m内陸に堤防がある。2011年東日本太平洋沖地震に伴う津波の影響で住宅地内は基礎しか残っておらず、また敷地内では洗掘による侵食や堆積も生じ凹凸が激しい。移動計測は一部残された街路を使ったが、大半は道の無い住宅敷地、松林、砂浜を縦横に緩徒歩で移動した。図7(1)では、試験範囲の実際の標高は平均約3mだが、簡易GPS計測による標高は平均約10mで差が大きい。これは標高とジオイド高との差なのでここでは無視する。図7にそれぞれ地形形状の一致している場所に関し、高低のテキストを付し、現地の地形起伏との対照を通じて簡易GPSの移動計測からのDEMの精度を考える。

現状をよく表している点を列挙する。道路上の高1、住宅地内の高2、交差点付近の高3、住宅地内の高4、松林中の砂州の高5、堤防の約20m内陸の高6と7、堤防上の高8と9、堤外の高10では、実際の起伏のように周囲より高くなっている。住宅地内街路の低1と2、住宅地内の低3と4、堤防の約50m内陸の低5と6、堤防の約10m内陸の低7、堤外の低8と9では、実際の標高のように周囲より低くなっている。これより読み取れる地形的特徴をまとめる。まず南北方向に見ると、高3、5、4により海岸線に平行に連続する凸地形の砂州、高8と9により同様に連続する凸地形の堤防、さらに低5、6により同様に連続する、上記砂州と堤防間の堤間湿地が読み取れる。また低8と低9に挟まれる高10の凸形状は楔状なのでカस्प地形が表現されている。次に東西方向に見ると、低7と低8間は低地帯になっている。良く見ると堤防天端が若干低まっており、津波進入時と引潮時の洗掘された地形を示している可能性がある。この地帯はさらに内陸の低1、3まで続くため、全体的には東西方向の谷状地形を捉えている。対照的に高2、4、7、9、10により東西方向の尾根状地形が捉えられた。

したがって、簡易GPSによる移動計測では、計測結果を固定点の平均座標へ補正し、時間経過による座標変化の補正を実施することで、実際の

標高とは異なるものの、現実的な地形起伏をかなり捉えられることが分かった。

### 2. 大淀川での試験と検証

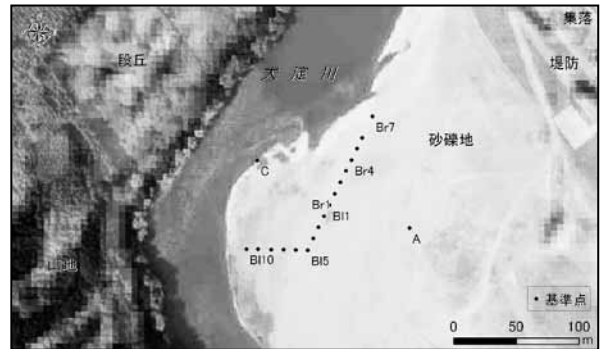
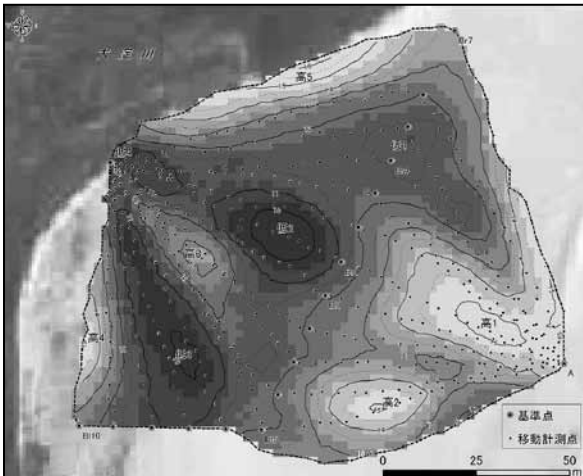


図8 大淀川河川敷の基準点配置  
背景は2010年撮影のカラー空中写真

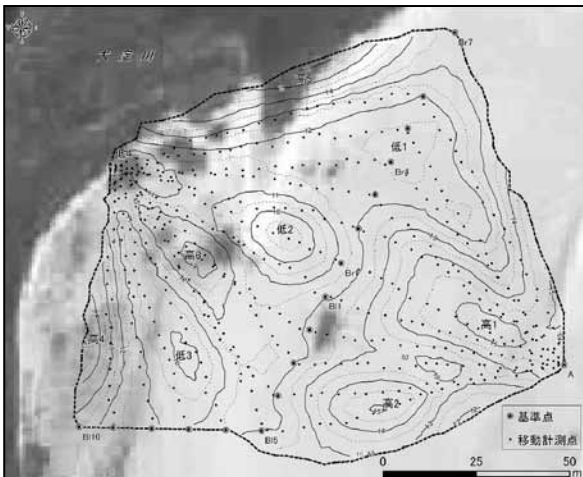
図8は大淀川河川敷の試験地(約100m四方)にて設置した基準点配置を示す。背景は国土地理院2010年9月撮影のCKU-20105-C13-5を用いた。試験地の西と南は大淀川があり、北と東は堤防や集落がある。大淀川の対岸には標高100m程度の山地と標高20m程度の段丘があり、それぞれ森林に覆われている。試験地は平均径30cmの円礫で構成される砂礫地で、洪水時に形成された砂礫堆の微高地と河道跡の凹地があり、両者は最大約5mの標高差がある。微高地は葎やスキ等雑草に覆われ、一部雑木も着生している。Aは東端の砂礫堆に、Cは西端の河岸に置き、両点の間にBr1~7とBl1~10を設置した。Aは14.73m、Cは10.23m、基準点のBr系は11.42m~12.49m、Bl系は11.07m~12.24mにある。移動計測はAとCをBr系かBl系の基準点を通して結ぶ。

図9(1)は試験地に作成された2mDEMによる標高区分で0.5m間隔の等高線を描画した。図9(2)は空中写真に等高線を重ね合わせた。

現状をよく表している点を列挙する。A付近の砂礫堆にある高1(約15m)、AとBl5の半ばの砂礫堆にある高2(約14m)、CとBl3の半ばの砂礫堆にある高2(約13m)、CとBl10の半ばの砂礫堆にある高2(約14m)では、実際の起伏のように周囲より高くなっている。なお、高5は河岸で低いはずが高くなったが、これは足場が悪い測線だったため計測開始時に機器に加速がかかった可能性がある。Br4付近の低1、CとBr1の半ばの低2、高3と高4に挟まれた低3、C付



(1) 結果 DEM による標高区分と等高線



(2) 結果 DEM による等高線と空中写真印象

図9 大淀川での緩徒歩による移動計測結果

近の低4では、実際の起伏のように周囲より低くなっている。これより低4と低3を結ぶ帯域、低1と低2と低3を結ぶ帯域は、洪水時の河道中心になる場所で低く、その河道縁に砂礫堆の高1～高4が形成されるとともに、現在は、本流からの入り口が砂礫堆で塞がれているという地形的特徴を読み取れる。

また現地観察と図9(2)から、標高の約14-15mの高1や高2では高燥のため植生がまばらで、標高約11mより低い低2や低3では洪水時の河道中心になるため植物が成長しにくいという標高と植生との関係が認められる。さらに標高約11-14mの高3や高4では、高燥だが地下水位までが近く、洪水時の河道縁になるため植物が流されにくく成長しやすい。同条件の場所として、等

高線では高まりを読み取りにくいBl1～Bl2付近もあげられる。

したがって、簡易GPSによる移動計測では、フレームを構成する基準点を設置し、基準点間の移動距離による座標補正を加えることで、より現実的な地形起伏を捉えられることが分かった。

## VI. まとめ

廉価な簡易GPSによる連続計測から、地形を分析できる詳細なDEM取得方法を検討した結果、本研究では、機材特性とその適用性を以下のように整理できた。

簡易GPSの機材使用実験を通じて得た機材特性は1)～6)の通りである。

- 1) 機材間でXY座標は約1mの差で小さいが、Z座標は約10mもの差があり大きい。XY座標は計測開始の約10分後から座標が安定し、Z座標は計測開始の約5分後から座標変化が安定する。なおZ座標は時間に対し一定割合で変化する。
  - 2) 機材各々の時間による座標値の変化傾向は似通っており差が一定なので、座標変化と機材の計測差を消去すれば計測精度を高められる。また計測では機材は向きを固定し静穏に扱う必要がある。
  - 3) 移動計測におけるXY座標取得は低層建物地域では数m程度ででき、高層建物地域では困難であり、Z座標取得はいずれの地域でも難しい。
  - 4) 移動計測は緩徒歩で実施するのがよい。始点と終点に相当する計測結果のXYZ座標は、実際の座標との差分を利用して移動距離で補正すれば、始点と終点間の計測点の座標精度を向上させられる。また計測開始と終了間際の加減速はZ座標に不自然な結果を生じさせる。
  - 5) Z座標の取得には周囲の障害物の影響を極力排除することが必要で、移動計測時には安定した速度を維持する必要がある。
  - 6) 自動車での移動計測では、XY座標は道路上を示す数m精度の取得が可能である。Z座標は条件が良ければ実際の標高差1m前後で取得できるが、加減速により5mを超す異常値を示す。加速するとZ座標が低下し、減速すると増加する。
- 現地計測試験を通じて得た現場作業での適用性は7)と8)の通りである。
- 7) 簡易GPSによる移動計測では、計測結果の固定点の平均座標への補正と時間経過による座標変化の補正を実施することで、現実的な地形起伏をよく捉えられる。
  - 8) 簡易GPSによる移動計測では、フレームを構

成する基準点を設置し、基準点間の移動距離による座標補正を加えることで、より現実的な地形起伏を捉えられる。

大淀川での試験では、山地・段丘に近いC点で天空率が低く、A点と調和するC点のZ座標変化を得られなかった。このため、簡易レーザー計測で基準点座標を求める必要が生じた。仮に100%に近い天空率の得られる対象地の場合、基準点2点に簡易GPSを設置し、3機目の簡易GPSで移動計測を行って、さらに効率良くDEM作成ができる可能性も考えられる。

## 謝 辞

本研究は平成24年度科学研究費補助金（基盤研究（C））：23501243「都市域における時空間地理情報を用いた氾濫原の特性評価の研究」（研究代表者 黒木貴一）及び23501253「土砂災害発生に関する経年的変化の検討」（研究代表者 磯望）並びに平成24年度学長裁量経費（研究推進支援プロジェクト）「GISを用いた生物の分布決定要因の解明－社会科と理科の融合」（研究代表者 唐澤重考）の一部を利用した。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 神谷泉・黒木貴一・田中耕平（2000）：傾斜量図を用いた地形・地質の判読，情報地質，11-1，11-24.
- 2) 千葉達朗・鈴木雄介・平松孝晋（2007）：地形表現手法の諸問題と赤色立体地図，地図，45-1，27-36.
- 3) 菊地真（2007）：光と陰，色彩による海底地形表現，地図，45-1，5-10.
- 4) 早川裕一・津村宏臣（2008）：LRFとDGPSを用いた野外調査における地形測量：トルコ，ハジトゥール・テペ遺跡における適用事例，地形29-4，421-434.
- 5) 黒木貴一・塚本嵩史・黒田圭介（2012）：簡易レーザー距離計を用いた斜面崩壊地形の計測方法，地図，49-4，1-6.
- 6) 黒木貴一・中村麻耶（2012）：糸島市の前方後円墳の地形計測，地図，50-4，1-8.
- 7) Ellis, J.M. and Rossetter, R.J. (1993): Remote sensing technology in support of geophysical operations. Exploration, environment and engineering. Proc. ninth thematic conference on geologic remote sensing, Pasadena, 1993. 2 vols, 209-220.
- 8) Algarni, D.A. and El hassan, I.M. (2001): Comparison of thin plate spline, polynomial, C1-function and Shepard's interpolation techniques with GPS-derived DEM. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2001-2, 155-161.
- 9) 荒木琢也・深山大介（2005）：単独測位GPSの測位精度と茶園における利用の検討，茶業研究報告，99，1-9.
- 10) 土屋淳・今給黎哲郎（1992）：GPS測量と基線解析の手引き，社団法人日本測量協会，335p.
- 11) 露木聡（1994）：森林資源調査におけるGPS利用の可能性－ディファレンシャルGPS測位精度の比較－，森林計画学会誌，23，45-58.
- 12) 野口仁志（1997）：GPSとレーザーレベルを利用した高精度高さ計測システム，測量，47-5，60-64.
- 13) 荒田昌潔・白井一洋・重松文治（2000）：広告特別企画GPSとレーザーレベルを統合した空港沈下管理システム－GPSによる高精度高さ計測システムの開発と現場への適用，建設機械，36-10，1-5.
- 14) 勝敏行・片岡直之・梶原覚（2007）：GPSとレーザを用いた情報化施工（路盤工）の実施例，舗装，42-10，19-24.
- 15) 海津裕（2010）：3次元レーザスキャナによる牧草地の草高および収量分布推定，北農，77-4，399-404.
- 16) 赤沢正晃（2011）：測量・地図作製業界におけるGISの現状と簡易GPSの利用法，地理誌叢，52-2，13-23.
- 17) 早川裕一・池田敦（2009）：レーザー距離計とディファレンシャルGPSを用いた地形測量データの精度検証：スイスアルプスの岩石氷河を例に，地形，30-1，29-38.
- 18) 松本秀明（1984）：海岸平野に見られる浜堤列と完新世後期の海水準微変動，地理学評論，76，537-550.