

地表環境変動調査に対する DGPS の利用性について

吉澤孝和・中川真治・石川清志・山下伊千造
信州大学工学部

Applicability of Global Positioning System by Differential Mode to Field Surveying of Environmental Change

Norikazu YOSHIZAWA, Shinji NAKAGAWA,
Kiyoshi ISHIKAWA and Ichizou YAMASHITA
Faculty of Engineering Shinshu University

Key words: Differential GPS, Environmental Change, Field Surveying

1. はじめに

主として地理的な情報に注目した環境調査においては、対象地域の地形や、地表に存在する種々の物体や動植物の状態に関する位置的な変動を追跡調査することが必要となる。

調査対象が比較的狭い範囲に限られている場合は、変化の生じた場所を確認することは容易である。しかしその範囲が数 km 以上に拡大したり、地形が複雑であったり、見通しのきかない山林などの場合には、調査地点の確認にかなりの時間と手数を要する。

このような場合に携帯用の小型 GPS 受信機を利用して DGPS 方式の観測法（後述）を採用すると、位置確認の精度と調査能率が大きく向上する。本文は災害調査や環境調査に対して、GPS を有効かつ簡便に利用することを目的として、現地観測を行い、基礎的な検討を試みたものである。

2 GPS の概要

GPS (Global Positioning System) は、人工衛星を利用して地球上や空中の位置を三次元的に求めるシステムである。すべての計画が完成したのは1993年の末で、地球上のほぼ全域で24時間にわたり、全天候の下で自分の位置を求めることが可能となった。このシステムは宇宙部、制御部、利用部で構成される。

宇宙部は上空 2 万 km の円軌道の上に配置された24個の人工衛星で、地球全体を一樣な密度で包むような位置関係を保って秒速約 4 km で1日に地球を2周する。そして測位に必要な情報を地上に向けて送信する。送信に必要な情報は地上の制御部から送り込まれる。

制御部は、地球上の5個所に設けられた既知観測局で、各衛星を常時追跡してその軌道を解析し、その後の衛星の軌道を予測した情報を各衛星に送り込む。

利用部は、衛星の信号を受信してその位置を求める利用者の総称で、民間の利用では航空機、船舶、自動車等のナビゲーションや測量などがある。

受信点の三次元座標 (X,Y,Z) は、受信時における3個の衛星の三次元座標とともに受信点から各衛星までの距離を求め、3元連立方程式を解いて得られる。各衛星の位置は時々刻々発信されるので、その信号が受信点に到達する時間を計測して衛星までの距離を求める。ただし GPS 衛星の原子時計（精度0.1マイクロ秒）に比べ、受信器の水晶時計は低精度で時刻誤差がある。時刻の誤差は、さらに1個の衛星からの信号を受信して補正する。よって GPS では4個の衛星からの信号を同時に受信することが必要である。

衛星の電波が受信機に到達するまでには電離層や対流圏の影響に加え、受信点近傍でのマルチパス（他物体で反射した信号の混入）の影響、衛星の時計や軌道の誤差、受信機の雑音による誤差などがある。これらの原因による位置誤差は4m 以下まで補正できる。

しかし単純に補正できない誤差源がある。それは SA (selective availability) と呼ばれるものである。そもそも GPS は米国が世界戦略的な目的で航法用に開発したものであり、SA は国防上の理由から故意に精度を劣化させる機能である。そのために第三者が測位すると最低30m、時には100m以上の位置誤差に振り回されてしまう。これを解消するために受信方法と解析方法に多くの研究がなされ、数 cm までの測位精度が得られるようになった。但しそのためには1千万円前後の受信機と数時間の連続観測を必要とする。

DGPS (differential GPS) は近年急速に普及してきた手法である。これは正しい座標値の分かっている測点(基準点)で測位して、SA や電離層等で生ずる位置誤差の時間的変動量を検出し、新たに測位しようとする他の場所(求点)でも同じ GPS 衛星を捕捉して同時に測位を行い、得られた値を基準点で検出した時間的変動量で補正するものである。これにより測位精度は大幅に向上し、求点で必要とされる観測時間は数分またはそれ以下に短縮される。

3 DGPS の基礎的検討

3.1 測位値の時間的変動について

本研究で検討に用いた受信機は、CCA-181S (日本無線株式会社製、計器用、0.0001分表示) である。写

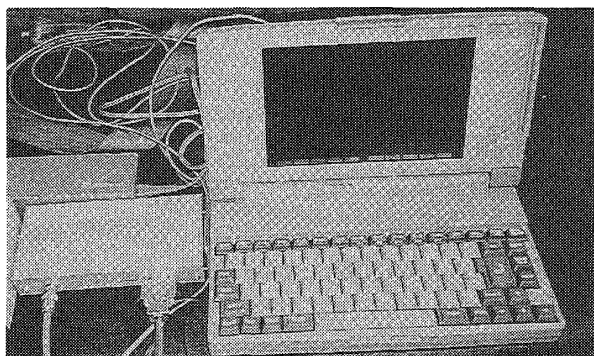


写真-1 自動車後部座席にセットしたGPS受信機(CCA-181S)とノート型パソコン

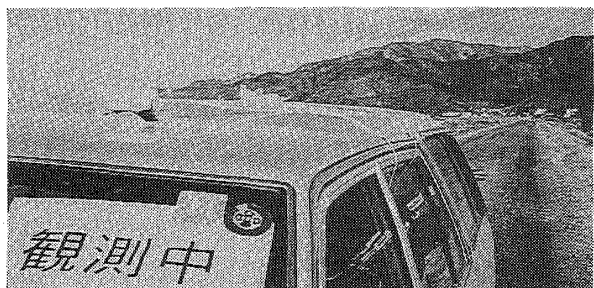


写真-2 観測用自動車と屋根につけたアンテナ

真-1は自動車の後部座席に置いたノート型パソコンとGPS受信機、写真-2は基準点[CR70]における観測状況である。

この検討では、千曲川右岸の69kmと70km地点の2つの距離標、[CR69]と[CR70](いずれの距離標も三次元座標が既知)を用いた。観測はDOP(測位に利用する衛星の幾何学的な配置による精度の低下率)が1という、衛星の配置条件としては最良の状態で行った。

図-1は両距離標において60分間同時観測を行った場合の緯度と経度の観測値の変動を示す。各グラフに示した横線は正しい緯度と経度(既知量)である。観測値は正しい値から最大0.02分(距離にして約35m)程度変動している。変動のパターンは、緯度と経度ではかなり異なったものとなる。しかし[CR69]と[CR70]という離れた2点の間でも、緯度同士または経度同士の変動パターンは非常に類似したものとなっている。このことはDGPSの可能性を示唆するものである。

3.2 DGPSによる基線ベクトル長の精度

上記の観測データを、[CR70]を基準点と考えて観測値の変動を検出し、これを[CR69]の観測値に補正するという形でDGPSを行った。さらに、補正した座標値を平面直角座標値(X,Y)に変換し、[CR69]と[CR70]2点間の水平距離(基線ベクトル長)を求めた。座標データは10秒間隔で取得されている。すべての計測値を平均した基線ベクトル長は $1133.701\text{m} \pm 0.0341\text{m}$ (平均二乗誤差)となった。なお、2点間の距離を光波測距儀を用いて実測した値は1133.584mである。

図-2はこのDGPS(60分間連続観測・10秒間隔でデータ取得)で得られた基線ベクトル長の度数分布である。最大の度数分布は光波測距儀の実測値の近くに生じている。平均値からのばらつきは最大 $\pm 1\text{m} \sim 2\text{m}$ である。

4 DGPSの実験と考察

自然災害や土地開発等によって地形や植生などに変化が生じた場合、現地調査で得られた変動領域を地形図の上に記入していくことが必要となる。このような場合を想定して、自動車走行によるDGPSを試行した。自動車を利用した理由は次の2点を効率よく検討するためである。

- 1) 測定点での観測時間をどこまで短縮できるか
- 環境や災害の調査では、変動の生じた境界部を移動

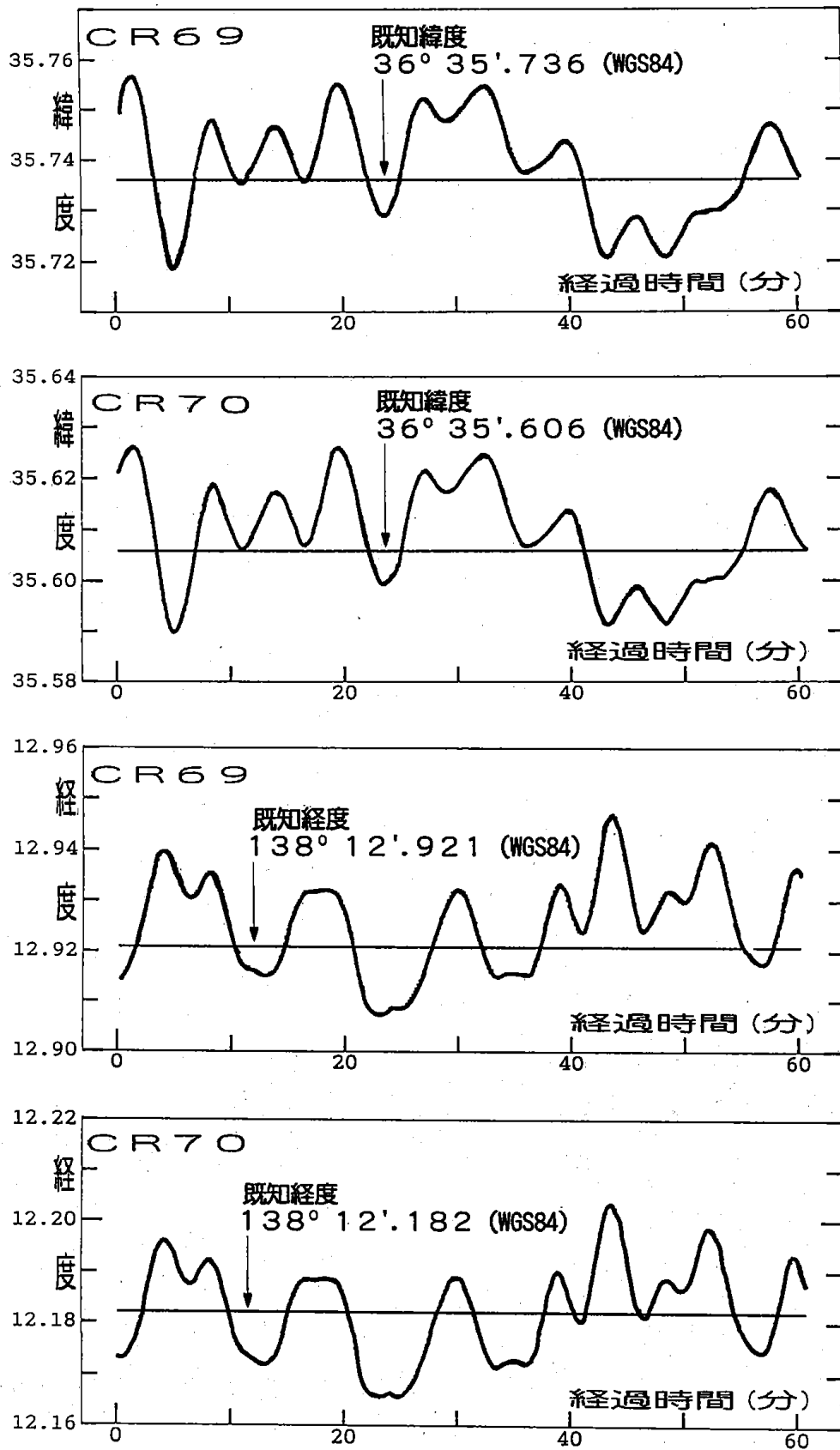


図 - 1 既知点 CR69と CR70における単独測位で得られた緯度と経度の時間的変動の比較

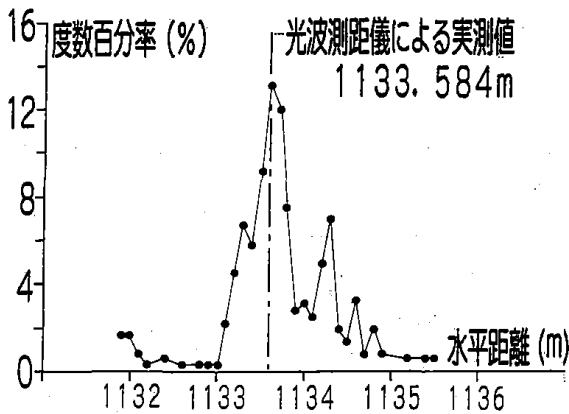


図-2 DGPSによる基線ベクトル長(水平距離)の度数分布と光波測距儀による実測長の比較(CR69~CR70間・6分連続観測)

しながらその位置を求めていく場合が多い。このとき位置確認に要するGPSの観測時間は短いほど能率が上がる。よって本研究では自動車の速度を、平地部では時速30~40km, 山間部では20~30kmとして走行し、特に位置確認の重要度の大きい場所では数分間の停止観測を行いながらデータを収集する。

2) 基準点と観測点で補捉して用いる衛星が異なる場合の影響

厳密に言えば、DGPSは基準点と観測点で同一の衛星を4個捕捉して受信する必要がある。また電離層や対流圏の影響は2点間の距離が10km以内ならばほぼ同一と考えられる。しかし本研究のように観測点を移動させていく場合には、地形や樹木や建物などによって上空視界が大きく変化するため、基準点(固定

局)と観測点(移動局)が近距離にあっても同一の衛星を捕捉することは困難となる。

そこで、自動車で移動中のGPS受信機が、時々刻々変化する上空視界の状態に対応して、自動的に4個の衛星を選択するようなモードで観測を行い、データを収集する。

4.1 平地部におけるDGPSの検討

観測車にGPS受信機(CCA-181S)を搭載して、連続的に受信しながら市街地を平均時速40kmで走行する実験を行った。観測車(移動局)は固定局から7~8kmの領域で走行させた。

収集した観測データ(10秒間隔の受信値)はパソコンを用いてDGPS補正し、これを平面直角座標値に変換した。得られた各点を順次直線で結合してプリントさせた。これにより自動車の走行軌跡が得られる。

自動車の走行軌跡が地図上に示された道路とどの程度の精度で一致するかをみるため、コピー機を用いてOHP用のフィルム上に、倍率を調整して走行軌跡を焼きつけた。この作業では、対比する地形図は国土地理院発行の1/25000地形図とし、地形図上の明確な道路の角と角を結ぶ長さに、それと対応する走行軌跡の角と角を結ぶ長さが一致するように、コピーの倍率を調整した。

図-3はこのようにして得られた長野市街地の走行軌跡である。図のa③b④c⑤d⑥のような順路で走行した。各地点における測位に関する考察を以下に示す。

③点：山際を走る道路のために、上空の約半分は視界がさえぎられる。地図上の道路中心線からの走



図-3 市街地の道路とDGPSによる走行軌跡の比較(国土地理院1/25000地形図)(1994・2・24)

行軌跡のずれは10m程度生じている。なお道路の屈曲部③で最大25m程度の位置誤差が見られるが、この場所では道路の拡幅工事も行われている。地形図の道路は拡幅工事以前の線形を示しているとも考えられる。

⑥点：地図上の「信州大学」から⑥点至るまでの直線道路上の走行軌跡は、左側走行の状況が明確に現われており誤差は見られない。しかし⑥点の県庁の角で左折して南県町に至る区間では10m程度のずれがある。この一帯は高層建築が多く

て上空視界がかなり狭まる。

⑦点：ここでは40m以上の大きなゆらぎが見られる。走行車線の反対側にはN T Tの高層のビルがそびえている。電波障害の影響も考えられる。

⑧点：長野市中央通りと昭和通りの交差点で3分ほど信号待ちをした。その間に一点に留まるべき測位の位置が図示のように60m近く変動した。この場所では信号機による電波障害や、看板などで反射した電波の混入（マルチパス）の影響が考えられる。

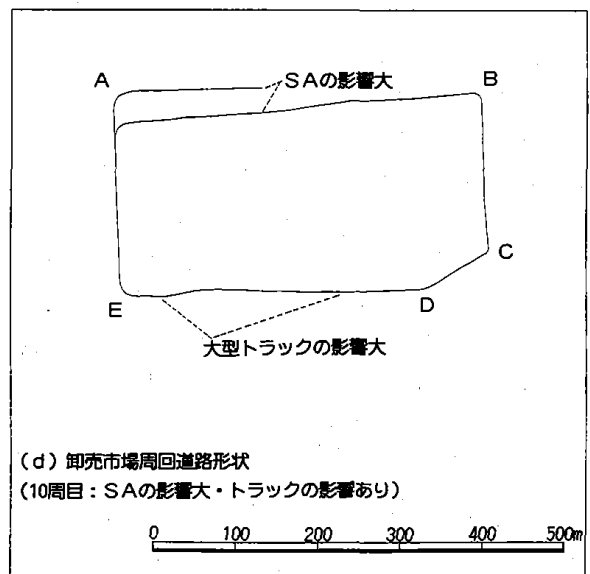
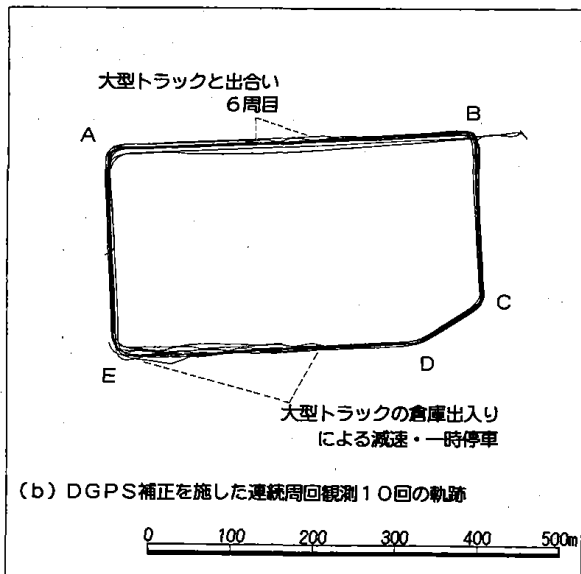
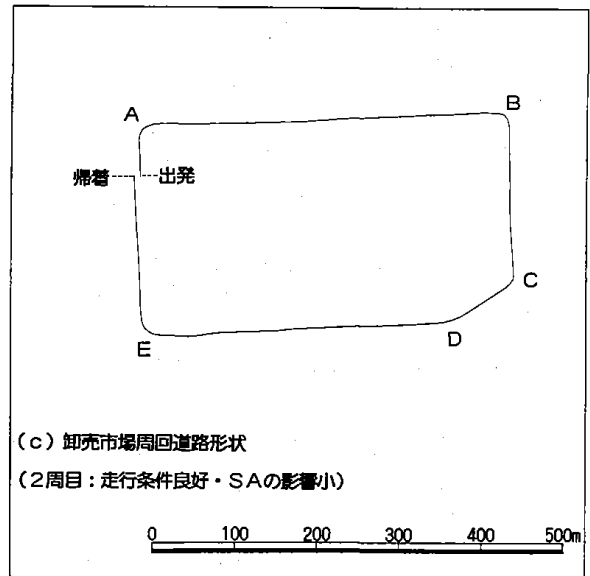
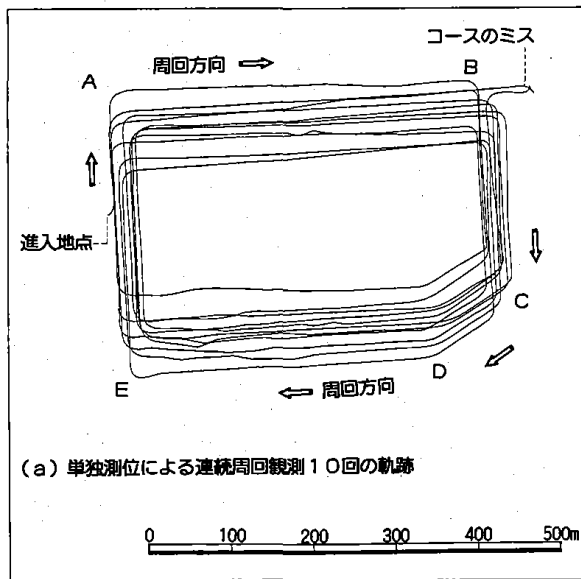


図-4 高速移動観測で得られる移動軌跡の検討

(a) 単独測位による周回観測10回の軌跡

(b) DGPSで補正した軌跡の平面図

(c) 精度の高い走行図形（2周目）

(d) 大きく乱れた走行図形（10周目）

⑥点：自動車が④点を出発して鶴賀に至るまでの区間では高層建築が多く、走行軌跡は道路の線形から20m程度ずれることが多い。しかし上千歳町の駐車場近辺の上空視界の良好な場所を走行する時は、軌跡はきちんと左側走行を示している。鶴賀の鉄道との立体交差を過ぎた後には建物の密度も高さも低くなる。従って走行軌跡は道路の線形とほぼ一致した。

なお地形図の作図においては、縮尺が小さくなるにつれ道路などは実際の寸法を誇張して記号的に表示する必要が生ずる。そのために地形図上の正確な位置から若干転位して表示する場合もある。1/25000地形図の場合、図上転位は0.5mm以内（現地長12.5m）で、やむを得ない場合1.2mm（現地長30m）を限度とする。

ここで検討した市街地の場合には、道路は記号的に表示されるが、道路記号の中心線と道路の真位置が一致するように作図されている。

4.2 平地部における高速移動観測の検討

GPSにおける大きな人為的誤差の発生源であるSAは、図-1に見るようになんかなり緩慢に変動する。よって測定すべき境界線上を素早く移動しながら測位していくことによって、測定対象の平面形状をかなり正確に把握できるものと考えられる。

高速移動観測が可能ならばDGPSによらなくても1台の受信機のみで、局部的な比較的狭い範囲における環境変化領域の平面形態を把握することができる。

この問題の検討手法として、新しく造成された卸売団地の道路を周回する実験を行った。1周1350mの平坦道路上を平均速度15m/秒で10回走行した。測位データは1秒ごとに収集した。上空視界は良好であった。

図-4において(a)図は10回の走行軌跡、(b)図はこれにディファレンシャル補正を施したもの、(c)図は1周する間の変動の少なかったもの、(d)図は変動の大きかったものを示す。10回の周回に要した時間は15分である。この程度の時間帯では電離層や大気状態の変動による影響は無視できる。したがって走行軌跡のばらつきの主たる要因はSAと電波障害であると考えられる。考察を以下に示す。

1) 走行は図-4(a)のA, B, C, D, Eの順路で行った。B点で突出した軌跡は、1回目の走行で道を間違えたものである。各コーナー(A, B, C, D, E)では速度低下が大きい、コーナーの形状は毎回の走行でほぼ同じ屈折形状が得られた。

2) 直線走行区間のうち、B-C, C-D, E-A区

間の形状はおおむね良好である。これは走行中に対向車が少なく、減速や一時停止の必要がなかったことによる。

3) A-B区間の中央部では変動が2回ある。ここでは6周目に大型トラックの影響を受けた。D-E区間は直線道路であるが、E点に近づくにつれて走行軌跡の変動が大きくなる。この場所では大型トラックの駐車や倉庫への出入りが多かった。軌跡変動はトラッ



図-5 山地道路の走行コース（長野市西方山地部）

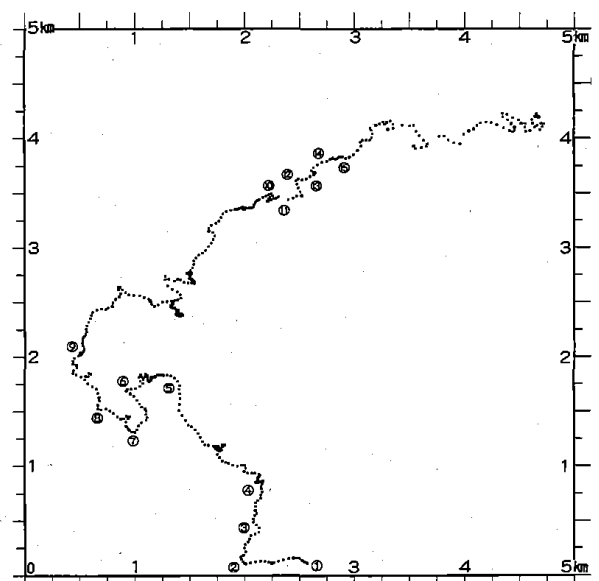


図-6 DGPSによる山地道路走行軌跡（図5対応）

クによる電波障害、受信中断、マルチパスなどの影響が大きい。

(b)図はDGPSによるもので、これを正解と考えれば、(c)図ははかりこれに近い形状である。しかし(d)図は図形的なゆがみが大きい。これはSAが大きく変動する時間帯に遭遇したためである。

以上の検討より、局地的な平面形状を1台の受信機のみで求めようとする場合は、連続受信に対する上空視界が良好で、出発点から到着点までの区間を数分以内に移動することができ、移動中に障害がなければ、かなり信頼度の高い形状が得られる、と言える。SAの変動は緩慢を繰り返す。よって数回の観測で得られた図形のうち、類似性の高いものを選べば環境変動調査などには十分利用できるものと考えられる。

4.3 山地部におけるDGPSの利用と検討

山地部に発生した環境変化や自然災害などの調査では、地形の複雑さに加えて樹木の繁茂は位置確認の大きな障害となる。また、都市化した平地部に比べるとランドマーク的な物体も少ない。このような条件の下ではGPSの利用は大いに期待されるところである。

実験の対象とした場所は長野市西部の富士の塔山を周回する道路である。図-5は走行コース、図-6は実測値にDGPS補正をした走行軌跡である。軌跡は5秒ごとに点をプロットした。走行は25km前後の時速で行った。図において多数の点が集中している場所は数分から十数分の間停車した場所である。時間の経過と共に測位値が変動している状況が分かる。DGPSでこれほどの変動が生じてしまう原因は、固定局と移動局で同一の衛星を捕捉できなかったことにある。

すなわちこの観測では、走行コースは固定局から7~10km離れた距離にある。山間部を走行するために、測位に用いる4個の衛星は基準点と同一の衛星を選ぶことは困難で、不可能な場合のほうが多い。よって、場所ごとに条件の良い衛星を受信機が自動的に選んでいくというモードで観測を行った。

走行中に捕捉できる衛星は地形や樹木などで大幅に変動し、DOP(衛星の配置形態による測位精度の低下率)はかなり大きくなる。時としては衛星を捕捉できずに測位不可能となる地点もあった。

以下、主要な地点における測位結果と考察を示す。

A) 一様な斜面と峡谷の比較

図-7の①は国道19号線からの分岐点で、ここから②までの区間は上空視界が良好なため走行軌跡(●印)は地図上の道路の線形と一致する。②から峡谷に入ると走行軌跡は地図から30m程度ずれる。しかし

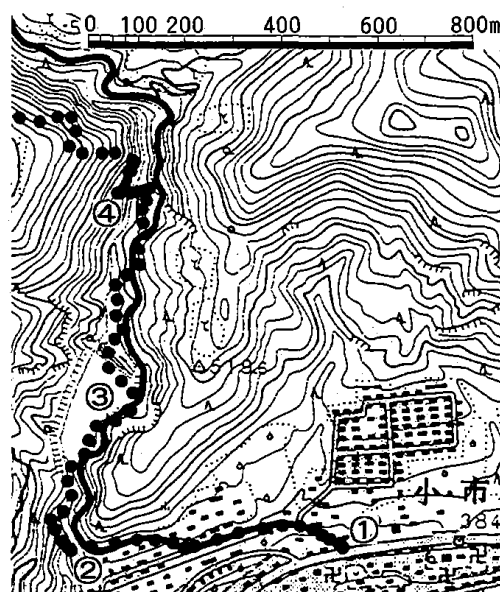


図-7 一様な斜面と峡谷でのDGPSの検討

谷幅の広い③では地図の道路と一致する部分もある。④は谷が深く狭まった場所である、この地点で10分間停車して受信したところ、図示のL字型のような形で前後左右に75m程度測位位置が変動した。この場所ではDGPSは不可能である。また捕捉できる衛星も少ないため、単独測位も困難を極め、誤差も非常に大きい。

B) 谷道と尾根道の比較

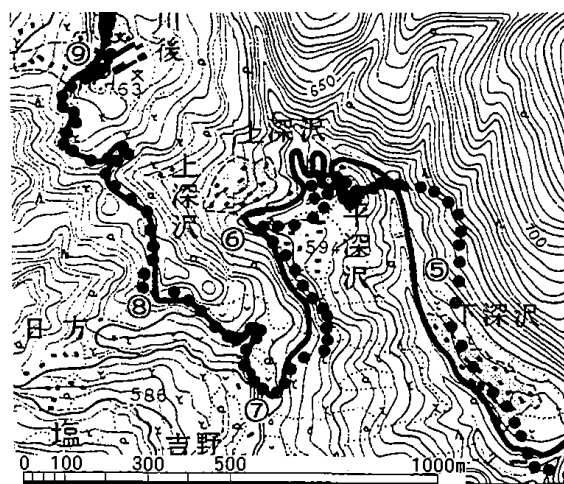


図-8 谷道と尾根道におけるDGPSの検討

図-8の⑤は図-7よりも上流の場所で、谷底の道路に杉林が続く。上空は閉ざされ、位置誤差は150mに達する。受信できたものの、測位値は信頼できない。⑥を過ぎると徐々に視界が開け、地図上の道路とは一致しないが、軌跡の屈曲形状は次第に類似してくる。⑦で尾根の先端に出る。この地点から⑧を経て⑨まで

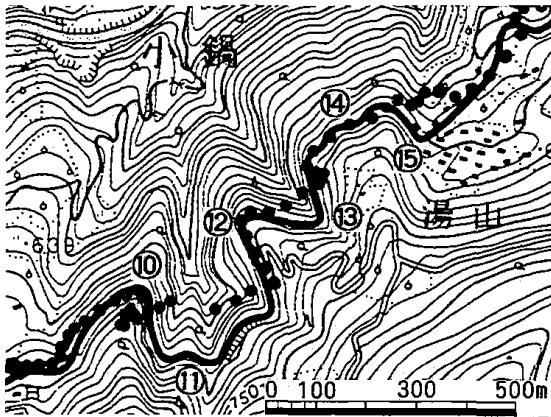


図-9 屈曲の多い山腹道路での DGPS の検討

の走行軌跡は、道路形状と良く一致している。樹木のほとんどが落葉樹で、冬季のため視界に障害はなかった。⑧で20mほどの揺らぎが見られる。これは道路のすぐそばに迫った小山の地形的な影響と見られる。

C) 山腹道路の検討

図-9は山の中腹の緩やかな勾配の道路上の走行軌跡である。⑩⑫⑭は尾根の先端部を、⑪⑬⑮は谷川を通過する場所である。この一帯は針葉樹と落葉樹がほぼ等量で不規則に混ざり合う林であった。自動車は図示の道路を左下から右上の方向に走行した。

走行軌跡は、尾根の先端を回り切る直前までは、地図の道路と良く一致しているが、回り切った途端に大混乱を起こし、計測が不可能となっている。これは測位のために捕捉していた主要な衛星群が、尾根を回った時点から、尾根の地形に阻まれて捕捉できなくなることを意味するものである。

以上より、単独測位でも DGPS でも、尾根の先端部では極めて有効に利用できるが、谷の地帯では精度が激減したり観測不能となることが分かる。

5 ま と め

近年、技術的には、GPSの信号と電波を民間人が受信しても数cmの測位精度を得るに至った。しかしそのためには過大な設備費と長い観測時間を要する。

環境変化や自然災害などの調査で測位精度を数m程度に緩和できるものとすれば、数十万円程度の携帯用受信機を用いて能率的な調査を行うことができる。

本研究はこのような手法の可能性を実験的に検討したものである。これまでに知り得た事項を要約する。

1) DGPSにおいて、上空視界の障害などによって双方の受信機が異なる衛星を捕捉した場合でも、2地点間の距離が10km以内ならば10m程度の測位精度

が得られる。ただし上空視界が著しく減少したり、付近にマルチパスの影響を与えるような物体が存在する場合はこの限りでない。

2) 1台の携帯用受信機による単独測位はSAの影響で100m前後の測位誤差を生ずることがある。しかし連続受信状態で2地点間を素早く(数分以内で)移動すれば、単独測位でも移動経路を10m程度の精度で求めることができる。ただし数回の観測で得られた経路を比較して形状を確認する必要がある。

3) 山地部では、尾根や凹凸の少ない様な斜面ではDGPSで数mの測位精度を得ることができる。しかし上空視界が山の斜面などで著しく遮られるような谷地形部では、測位が不能となる場合が多い。このような場所に対しては、高いアンテナを用いるか、尾根で測位した地点から地上測量を進めていくことになる。

なお樹木の繁茂状況は上空視界に大きく影響する。尾根であっても高い常緑樹に囲まれていれば測位は不可能であるが、落葉樹林の浅い谷地形ならば落葉期間に観測が可能となる。

人類の文化史とともに歩み続けてきた測量は、これまで地球のジオイドから脱出できなかった。しかしGPSは純幾何学的で画期的な測量手法である。近い将来には民間の投資で、GPSよりも性能の高い衛星測位システムが実現しようとしている。今後このシステムの利用分野は急速に拡大するであろう。

参考文献・引用文献

- 1) Terrence Slonecker and Brenda Groskinsly: GPS Applications in the U. S. Environmental Protection Agency, Surveying and Land Information Systems, Vol. 53, No. 2, 1993, pp. 117-124.
- 2) Christina L. Hulbe and Ian M. Williams: Stop-and-Go GPS in Antarctica, Surveying and Land Information Systems, Vol. 53, No. 2, 1993, pp. 151-158.
- 3) 佐藤 浩・久松文男: ディファレンシャルGPSを利用した1/25000地形図修正に関する研究, 国土地理院時報, No. 78, 1993, pp. 10-19.
- 4) 衛星測位システム協議会編: GPS導入ガイド, 日刊工業新聞社, 1993, pp. 50-98.
- 5) 吉澤孝和・中川真治・石川清志・山下伊千造: 携帯用GPS受信機による地理情報の収集に関する基礎的研究, 応用測量論文集, Vol.5, No.1, 1994, pp.103-111.

(受付 1996年2月23日)