

重力探査におけるGPSの利用可能性

駒澤正夫¹⁾・杉原光彦²⁾

1. はじめに

重力探査の特徴をあげれば、①機材としての重力計は、バッテリー等の付属品を含めた総重量が10kg程度と軽量で他の手法では調査の困難な地形の険しい山岳部でも調査を小人数で行うことができ、測定も迅速にできる機動性、②装置自体が軽量なので短期間に広範囲をカバーすることができる経済性、③データに所定の精度があれば調査期間や測定者が違って、データのコンパイルが可能であるデータの再現性、④得られた結果は最終的には重力異常図（ブーゲー異常図）として作成されるが、岩石の密度という最も基本的な物性が重力異常に反映するので、地質構造との対比が容易にできる直観性、等があげられる。ただし、①と②について、もう少し詳しく述べると、調査に使用する重力計自体は軽量で問題はないが、実際は測点の位置出しや標高を決める測量機材（レベルやトランシット）が重かったり、尺取り虫的に測量を積み重ねていかざるを得ない。このことが重力探査の最大の特長である機動性と経済性を損なっていた。

近年、GPS (Global Positioning System) という人工衛星を利用した測位システムが軍用目的に米国で開発され、それが民需用に利用できるようになった。GPS自体は測地観測に利用できる位に高精度が達成できるものと云われ、実際にそうした観測結果も報告されている。近い将来各分野で急速に、しかも広範囲にわたって利用が進むものと思われる。そうした機運のなかで、重力探査におけるGPS利用の可能性を機動性、精度、効率性、経済性といった観点から述べてみる。

2. GPS と他の測位システム

従来のロラン、オメガ、デッカなどの電波航法装置が陸上での探査にそれほど応用されなかった理由は、発信局が地上にあるため地上の障害物の影になる場合がある

ことや電波の到達範囲には限度がある等のために利用が制限されてしまうなどもあるが、主たる理由はそれらの測位システムの精度に問題があったためである。すなわち陸上での応用は、その測位点が大縮尺の地形図の事物に乗る位の精度（数10m以内）がないと実用にならないが、従来の測位システムでは所定の精度を実現することはまず不可能と考えてよい。

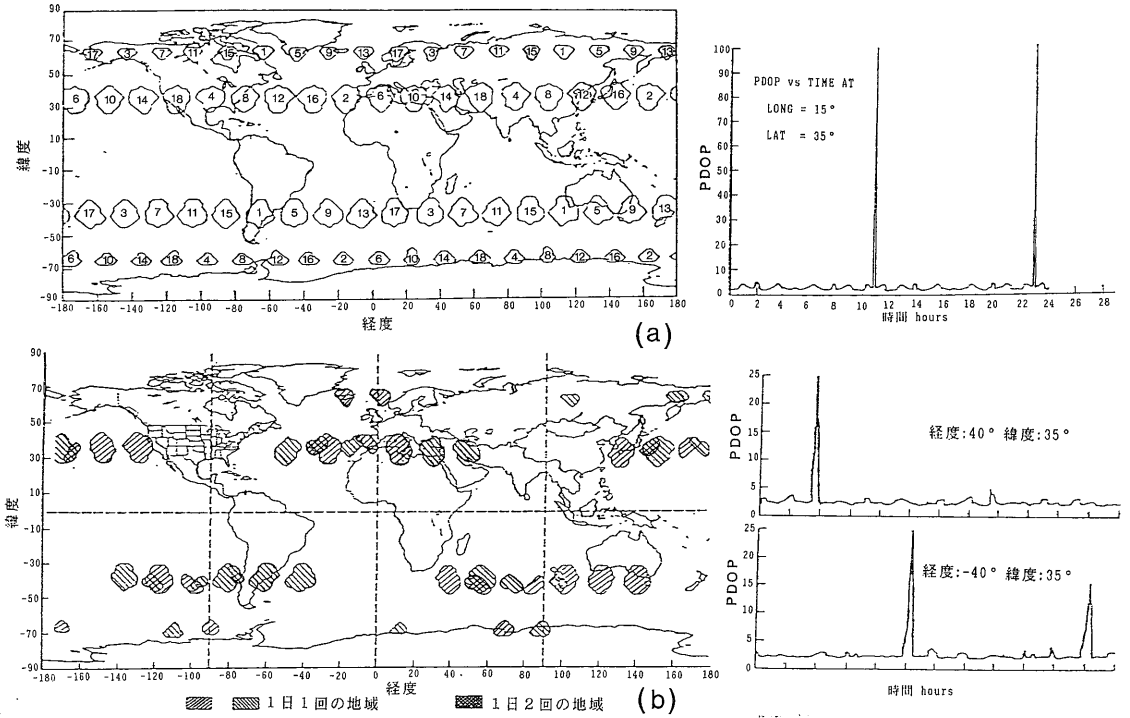
また、GPSと同様に人工衛星を用いる測位システムとして NNSS (Navy Navigation Satellite System) があるが、GPS が同時に3個ないし4個の衛星の電波を受信して三辺測量的に測位するのに対し、NNSSは1個の衛星の移動による電波のドップラーシフトによる距離差を利用した双曲線測位方式で測位する点が異なっている。また、NNSSは、1,100kmという比較的低い高度の極軌道（周期は108分）の人工衛星を利用しているので衛星が上空にとどまって電波を受信できる時間が短く、会合周期も1～2時間程度と時間が空くので、次々に測点を移動して一日当たり数十点の測定を行う重力探査には利用できない。

そうした背景のもとに従来の測位システムを更新するものとしてGPSが開発された。GPSは、汎地球的測位システムとでも和訳できよう。その測定原理は、位置が確定した複数（3～4個）の人工衛星から発射される電波の伝播時間から距離を求め、それらを半径とする複数の球面の交点を測位点とする一種の三辺測量である。類似の例として、地震の震源決定をイメージしてみればよいであろう。なお、GPS受信機の時計は衛星と同期していないために位置座標だけでなく時間も未知数になるので、3次元測位をするためには4個以上の衛星からの受信が必要である。2次元測位をするためには、測点の標高値の設定と3個の衛星からの受信データですむ。

GPSの主な特長は、①システムの名称が示すとおり全地球的な範囲で恒常的に利用できる（GPS衛星が全て打ち上げられていないので、現時点では利用できる時間帯は制

1) 地質調査所 地殻物理部
2) 地質調査所 地殻熱部

キーワード：重力探査, GPS



第1図 18衛星による測位不能の地域と時間

(a) 数字の増加に従って測位不能地域が40分毎に移って行く。(b) 予備衛星を加えたときの測位不能地域と頻度。
PDOP は測位誤差を表わす係数

限されているが、今後の運用スケジュールによれば、1992年には制限が殆どなくなる(第1図参照)、②衛星からの電波が受信できれば測位が瞬時(リアルタイム)にして可能である、③衛星軌道の高度が約20,200km(周期は0.5日)と高く、上空にとどまっている時間が長いので上空が開けているところであれば測位ができる、④測位精度が高いためデータの再現性や信頼性が高い、⑤従来の測位システムと違い水平測位だけでなく高度の測定もできる(3次元測位)、⑥高速の移動体における測位はもちろん、速度や方位角の測定ができる、等があげられる。

以上に述べた従来の測位システムとGPSの測位システムの比較を第1表に示す。なお、位置精度については最も状態のよい場合を示したもので、一般には、オメガ、ロランC、デッカ、NNSS、GPSの順に精度が良くなると云われている。

3. 陸上の重力探査への応用

従来、陸上で重力探査においてはブーゲー異常値の算出には水平位置の精度より標高値の精度の方が大きな影響を及ぼすこともあって、水準測量によって標高値は

精度よく求められていた。つまり、水平位置が数10m変化しても地形補正値が1mgal(ミリガル=10⁻⁸cm/s²)以上変化することは稀であるのに対し、高度補正値の誤差を1mgal以内に抑えるには標高値を3m以内の精度で決定しなければならない。したがって、水平位置については、特に三角測量をすることはせず、特徴のある地形を地形図に対比させたり、標高値を参考にしたりにして位置を決めていた。しかし、そうした方法では測定者の地形図を読む能力によって重力図の精度が規制されているということになる。また、機動性を上げるために、水準測量を気圧高度計で代用することもある。気圧高度計による山岳地での測定値の精度は、よくても数10m程度なので、よほど注意して用いないとデータを乱すだけで益がないことがある。現に昭和40年代の山岳部での測定データについては、調査に利用した旧地形図が航空写真に基づく地形図でなかった(今の地形図に比べてコンターに丸みがあり、地形図の枠は今の地形図とは経度で10.4"ほどズレている)ためもあって、誤って別の沢や尾根で測定したと考えられるデータも少なくないようである。

以上の事情から携帯型で簡便に測位のできるシステムが待ち望まれていたわけであるが、そうした時期にGPS

第1表 測位システムの比較一覧表（秋山（1989）を一部修正して転載）

システム 項目	オメガ	ロランC	デッカ	NNSS	GPS
位置精度 (m)	1,800	100~500	20~100	30~500	15~100
稼働率	連続	連続	連続	部分	連続（現在は部分）
カバーエリア	全世界的	日本で一部不可	山岳部で一部不可	全世界的	全世界的
最大追跡速度 (km/h)	360	150	30	—	100~1,000
短更新能力 (秒)	1	1~数	1~数	10	1~数
システムの現況と廃止の時期	2000年頃まで運用	今後も運用	1992年頃に廃止を検討中	1994年完全廃止	1992年頃に完全運用
衛星数と軌道	—	—	—	極軌道をもつ5衛星	最終的に18衛星 20,000kmの6軌道
信号と使用周波数	連続波10.2, 11.05, 11.3, 13.6kHzおよび固有の周波数1	パルス 100kHz	連続波 70~130kHz	150MHz, 400MHz	C/λ 1575MHz P ₂ 1227MHz

が開発された訳である。

(1) GPS 利用の野外実験

地質調査所では平成元年度に携帯型のトリンプル社製10Xを購入して、重力探査に応用した。同機の外観を写真1に示すが、その重量はトランクに収納された状態でも5kg程度と重力計より軽い。実際に背負って山岳部の測定に用いてもたいして負担にならなかった。このGPS測位装置を利用した重力観測のテストを岩手県岩手山山麓と伊豆諸島の新島、式根島及び神津島において実施した。2次元測位に用いる標高値の設定は気圧高度計によった。

(2) 実験結果

このGPS装置の座標系は東京基準系に設定されているので、測位値がそのまま国土地理院の地形図と直接比較できるようになっている。第2図に岩手県雫石町の林道における重力測定結果を示す。(A)は従来のように林道の曲がり等の特徴から、測点を林道上にプロットしたものである。測点標高はコンターから読んだものと気圧高度計の読みには数10mのズレがあったが、コンター値の方を採用した。一方、(B)はGPSによる測位点の方を優先させたため、測点が林道から外れているが、気圧高度計の読みとは整合していた。結果として、(A)は地形図の林道の位置が間違っていたためにコンターが不自然になっている。一方、(B)はコンターが自然になったことが判り、位置精度が上がったことを表している。いくつかのフィールドでの経験からも、上記の例のように地形図上の林道の位置がズレていることは、特に稀なことではないと思われる。

また、島嶼でのGPS測定と岩手県下の測定を比較し

てみた結果、位置の決定精度に差がなかったことから、地域的な差はまずないと考えられる。

なお現時点では、4個以上の衛星を連続的に受信することは困難なこともあって、3次元測位による標高値の精度のチェックは行っていない。

(3) 広域重力探査への指針

トリンプル社製10Xをフィールドに使用した実感を述べてみることにする。国土地理院の1/2.5万地形図上で位置が確定した点で位置精度をチェックした結果、水平位置の誤差は数10m以内に抑えられることが判った。また、2次元測位においては、設定する標高値の誤差と同程度の誤差が決定される水平位置にも生ずると考えられる。以上から、測点間隔が500m~数km程度で、コンター間隔が1mgal程度の重力図を作成する概査では、

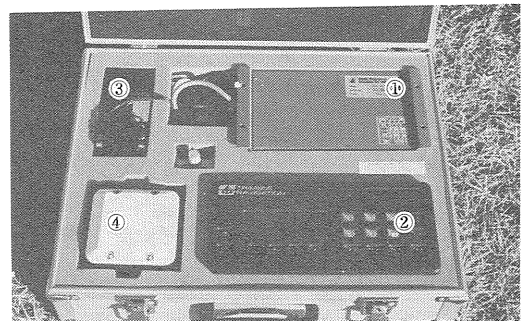
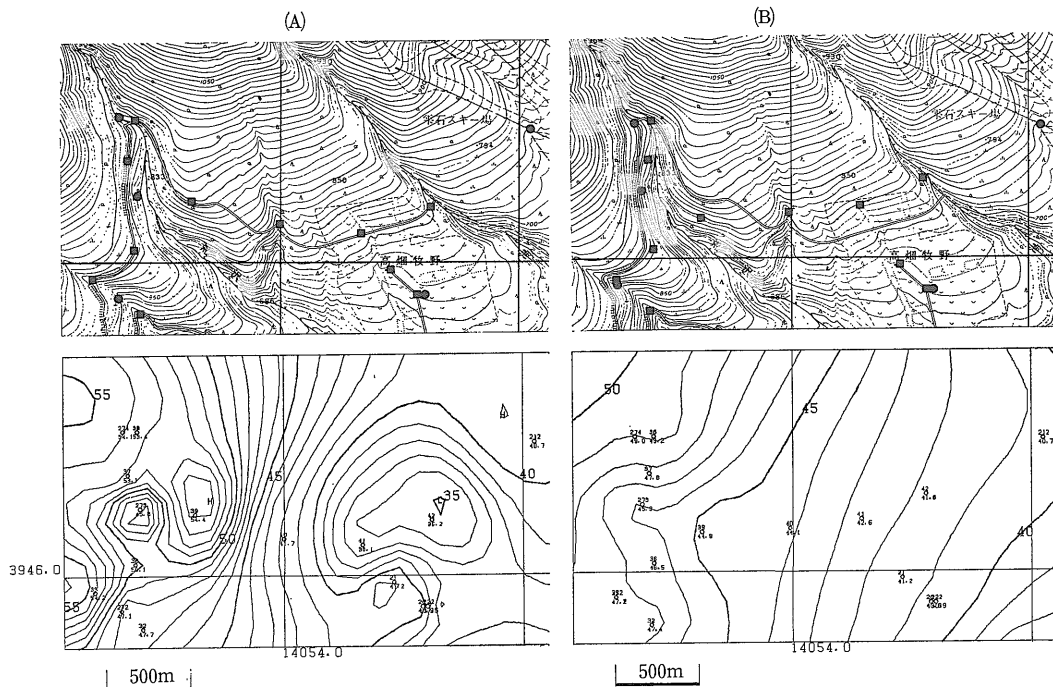


写真1 GPS装置(トリンプル社製10X)の外観、トランクに収納された状態(46cm×35cm×15cm)、①本体、②表示部、③アンテナ、④バッテリー



第 2 図 従来の測点位置の決定法と GPS 測位による改善 (ブーゲー異常: $\rho=2.3\text{g/cm}^3$)

●印: 既存測定点, ■印: GPS 装置を利用した新測定点

(A) 林道上にプロットし, 標高はコンターより読み取る。(B) GPS による測位点をプロットし, 標高値はバロメータとコンターより決定。

1/2.5 万以上の精緻な地形図が完備していれば, 気圧高度計と併用することで, 単独の GPS 測位でも充分に有効であると考えられる。

4. 海上重力測定

船上重力計は水平安定台に設置され, その測定値には移動平均フィルター等が操作されるために船の動揺による短周期の加速度はキャンセルされるようになっていいる。このため, 船上重力計による重力値の精度は 1 mgal 以上が達成されていると云われている。それにもかかわらず, 海域でコンター間隔が数 mgal の重力異常図を描くのは困難なのが現状である。それは陸上に比べ重力測定値自体の精度が低いとか測定点の位置にズレがある (従来の測位システムでは, 緯経度の決定精度は $0.2\sim 0.5'$ 程度と云われている) ためだけでなく, 船速 (正確には対地速度) の誤差のためにエトベス補正值に誤差を生じてしまうことに大きな原因がある。

エトベス補正は, コリオリの力 (転向力) とは別のものので, 地球の表面 (球面) に沿った運動体に生ずる遠心力と静止状態の自転のみによる遠心力との差として定義される。つまり, 地球の半径を R , 自転角速度を ω , 緯

度を ϕ , 対地速度を V , 方位角を α (真北より東へ計る) とおくと, エトベス補正 δg_E は,

$$\delta g_E = 2\omega V \cos\phi \sin\alpha + V^2/R$$

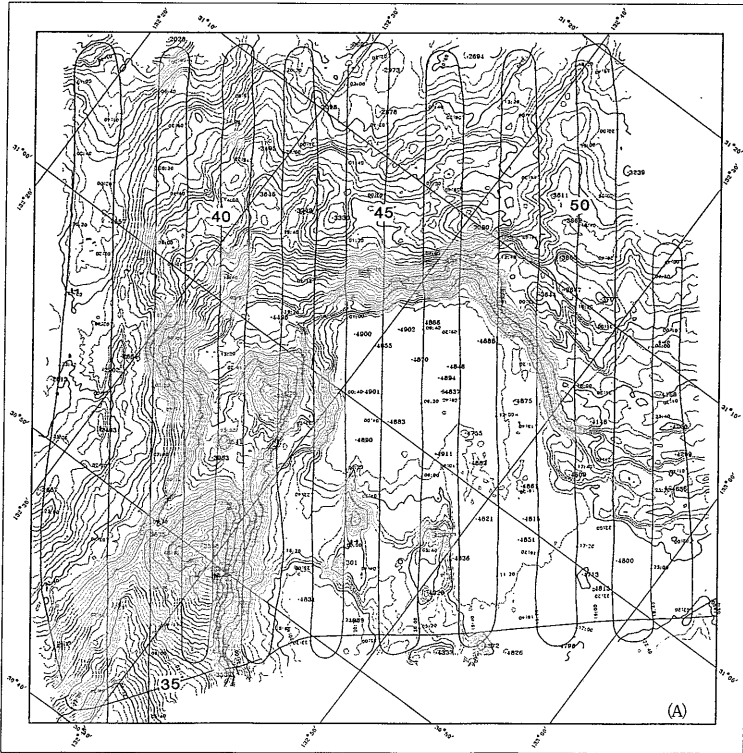
によりあたえられる。通常の調査速度である 10ノットの緯度が 35° における, δg_E の微小変化を測位に関係する変数 V と α の微小変化で表すと

$$\begin{aligned} d(\delta g_E) &= 2\omega V \cos\phi \cos\alpha d\alpha \\ &\quad + (2\omega \cos\phi \sin\alpha + 2V/R) dV \\ &= 1.073 \cos\alpha d\alpha + (6.146 \sin\alpha + 0.0831) dV \end{aligned}$$

となり, 航跡の方向が, 南北 ($\alpha=0^\circ, 180^\circ$) なら方位角の精度を要し, 東西 ($\alpha=90^\circ, 270^\circ$) なら速度の精度を要することが判る。いずれにしても, 10ノット程度で動いているときの誤差を 1 mgal 以下に抑えるには, 速度は 0.1ノット程度, 方位角は 1° 程度の決定精度を要する。

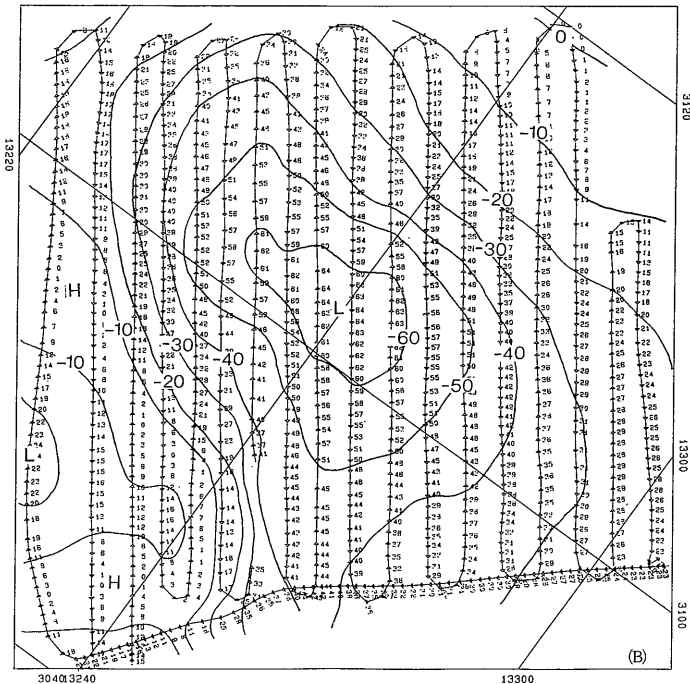
また, 各々の調査データだけならスムーズなコンターが描けても, 陸上調査では当然になっている何件かの調査の重力データの編集を安易に行くとコンター (等重力線) がガザガザになり, 一目で各々の測点での重力異常値の精度がないのが判る。こうした従来のデータについては, 先ず, 最も信頼性が高い水深データを海底地形図や他の調査の水深データとクロスチェックして, 位置の決定精度を推定するしかないであろう。つまり, スム

Kyushu-Palau Ridge and Western Nankai Trough
TRACK CHART & TOPOGRAPHIC MAP



CONTOUR INTERVAL = 50

(BOX 7) KYUSHU-PALAU RIDGE AND WESTERN NANKAI TROUGH
FREE-AIR ANOMALIES



30403240

[30.97N 31.45N] IN LAMBERT

13300

UNIT IN MGAL

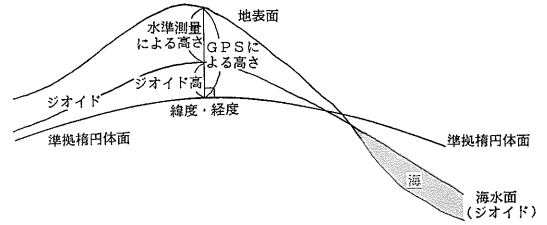
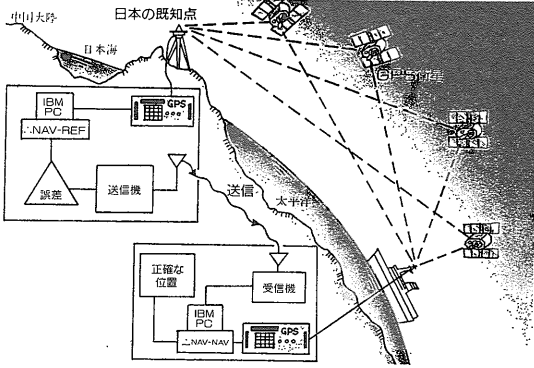
ズに水深コンターが描けるものから順に優先的に編集してゆき、精度の落ちるものは測線を平行移動させる等の処理をして整合性をもたせる等の配慮が必要になる。ただし、陸上の測点のように単に、測点を移動させればよい訳でなく、エトベス補正值も計算しなおすケースもでてくる。

近年、海洋調査において GPS を用いることは常識化しつつあり、実際に高精度のデータを出している。例えば、1984年に行われた日仏海溝共同調査 (KAIKO 計画第 1 期) では、測位はロラン C と GPS で行われ、マルチ・ナロービーム音響測深や重力測定も行われた。その結果として、緻密な地形図が作成されたことから測位システムの優秀性が窺われる。また、航跡の交点でのフリーエア異常値についても、1~2 mgal 以内で一致し、ほぼ重力値の測定誤差におさまっていると考えられる。GPS の利用により船位や船速の精度が飛躍的に上がることで、今後の船上重力データの精度が格段に向上するものと期待される。なお、第 3 図に KAIKO 計画第 1 期グループ (1986) で得られた結果の一部を示す。

5. 精密重力探査への利用可能性

ここでいう精密探査とは測点間隔が 10~100m 程度の古洞や遺跡の調査を目的とするものを想定する。この場合やコンター間隔は、0.05~0.1mgal 程度の精度のものが必要であるが、その精度を保証するには水平位置精度は 1 m 以内、標高値は 1 cm 程度が不可欠である。この場合も、従来であったら水準測量と平板測量という 2 タイプの測量を組み合わせて実施せねばならぬ

第 3 図 GPS 測位による海底地形図(A)とフリーエア異常 (B) (KAIKO 計画第 1 期グループ (1986) より)



第5図 水準測量と GPS 測位による標高値の比較

第4図 ディファレンシャル GPS 方式の概念図 (鳥本, 1989 より)

いが、広域の概査に比べれば労力が少ないとはいえ効率化を損ねるといわねばならない。そうした目的にも GPS が利用できる可能性がある。ただし、この場合は、2 台の GPS 受信機 (この場合は位相差やドップラーシフトも測定) を利用して精度を上げるディファレンシャル GPS システムという方法を講じなければならない。なお、この場合は、広域的な調査でないので水準測量による標高値と GPS による標高値の差であるジオイド高の起伏変化の考慮は必要がない。

このシステムの概要は第4図のように示せる。つまり、2 台の受信機のうち1台は位置の確定した場所に固定点として設定し、他の1台を測点に沿って移動させて、同時刻に同じ組み合わせの3個以上の GPS 衛星によって固定点と測点の位置を求める。その結果、得られた両者の座標値の差が数 cm 程度の誤差で求まるといえるものである。この方法では、電離層による電波伝播の遅延等の両者に共通な擾乱項がキャンセルできることになる。それは、磁気探査の日変化補正をするに、レファレンス点で磁気測定をするのと似ている。

ディファレンシャル GPS システムの精密重力探査での具体的な使用法を述べてみる。重力測点で GPS 測位をするのは、当然のこととして、地形補正等に利用することを考慮して測点周辺をランダム的 (地形が平坦なら粗く、地形に起伏があれば細かく) に GPS 測位をして3次元的に座標を求めることを心掛ける。そうして得られた座標値を入力データとして、コンピュータを用いて地形のメッシュデータを作成してやれば、測点周辺の地形補正を簡便かつ精密に実施できることになる。

儀を利用している光景を見かけるケースが多くなったように、今後、GPS の運用も充実して3次元測位の利用が普遍的になってくると思われる。ただし、その際注意しなければならないのは、GPS による標高値は、そのままでは水準測量による標高値とは一致しないことである。つまり、地形図の標高値は水準測量から算出されたもので、それは地球重力場に規制されたジオイドからの高さである。一方、GPS 測位より得られる標高値は、地球の局所的な重力場には規制されない人工衛星の軌道より決まる準拠楕円体からの高さになる。第5図に両者の関係を示すが、GPS による標高値を地形図の高さに対比させるためには詳細なジオイドの情報が必要である。これは別の云い方をすると、水準測量と GPS 測量との差が重力場となるので、重力計を用いない重力探査ができるということになる。

また、GPS 衛星には高精度の原子時計が搭載されており、それらを受信すれば遠距離間での時刻の比較測定が可能のため、GPS は高精度の時計としても利用できる。その精度は数〜数10ナノ秒 (10^{-9} s) と云われ (松村, 1989)、高精度の時計を要する地震観測などに応用が期待できる。なお、GPS 受信機は、科学技術庁科学技術振興調整費による地質調査所の重点基礎研究の一環で導入されたものである。

参考文献

秋山 實 (1989) GPS の災害情報システムの利用. 国土地理院時報, no. 69, 35-42.
 KAIKO 計画第1期グループ (1986) 日本周辺海溝の地形と構造. 日仏海溝計画 [第1期] のデータ図集. 東京大学出版会.
 松村正一 (1989) GPS による精密時刻比較. 国土地理院時報, no. 69, 25-28.
 鳥本秀幸 (1989) GPS 時代へのカウントダウン. 造船技術, 22, no. 6, 43-56.

6. おわりに

近年では、土木現場の測量でも巻尺の代りに光波測距
 1990年4月号