地質調査所月報，第 40 巻 第 11 号，p. 601-611, 1989　　528.27

地質調査所重力補正標準手順 SPECG 1988 について

地質調査所重力探査グループ*

GSJ GRAVITY SURVEY GROUP (1989) On the standard procedure SPECG1988 for evaluating the correction of gravity at the Geological Survey of Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan,* vol. 40(11), p. 601-611.

Abstract: We developed a new standard procedure of gravity data processing at the Geological Survey of Japan (GSJ), which was named as SPECG 1988, in order to compile gravity maps of new series publication at GSJ. The procedure prescribes the calculation scheme and formulations for normal gravity, free-air reduction, atmospheric correction, lithospheric correction, and Bouguer and terrain corrections. The accuracy of 0.1 m*gal* in principle was contemplated to each correction. In this procedure, 1) the second order free-air gradient is taken into account, 2) the lithospheric correction, as well as the atmospheric correction, is applied to the gravity measurement below sea level, 3) the Bouguer and the terrain corrections are carried out as an effect of bounded spherical crust and actual topographic undulation relative to the spherical surface, respectively, within the same distance range of 60 km, and 4) the terrain correction is classified into 10 zones, and at inner zones the effect of detailed topographic relief is taken into considerations, whereas the topographic effect is approximated into simpler model at outer zones. The computer program of executing this procedure coded by us using Fortran language is reported in another paper.

1．はじめに

地質調査所では従来より重力探査データの編集を行ってきており，その成果は 20 万分の 1 地質図幅や一部の 5 万分の 1 地質図幅に等重力線データとして併記されている．また，「静岡・御前崎及び横須賀地域」と「関東地域」については特殊地質図として重力図が刊行されているほか，地熱地域についての等重力線図も公表されている．しかし，地質構造を対象とする重力探査データについて言えば，野外測定に多大の労力と時間を必要とするため，国土をおおいつくす観点からは不十分な測定しか行われていなかった．

地質調査所では，独自の調査データに加えて，永年にわたって民間企業を含む各機関の協力により探査データを蓄積している．近年では，特に金属鉱業事業団による系統的な広域調査と新エネルギー総合開発機構（現，新エネルギー・産業技術総合開発機構）による全国地熱資源総合調査によってデータの整備が進み，国土面積の過半を占めるに至った．各種のデータは，測点の若干の粗密はあるものの，統一的な編集を広域的に行うことにより，地下資源開発・地質環境・防災をはじめ地質構造に関連する各分野において有効に活用することが期待される．このような状況の下で，地質調査所では関係各機関の協力を得つつ，国土の基本的な地球物理的情報の一つとして，新しく「重力図シリーズ」を出版することが企画された．

新「重力図シリーズ」としては，当面，関東地方から東北地方に至る地域の縮尺 20 万分の 1 で 1 m*gal* コンターの重力図（ブーゲー異常図）の編集出版が予定されている．この重力図シリーズの編集にあたって，我々は各種の重力補正についての標準的な方法・手順及び出版重力図の原則的な仕様に関する検討を行った．本報告は，この検討に基づいて定めた「地質調査所重力補正標準手順 SPECG 1988」の内容を記述し，重力図を読む利用者

* 中塚　正〈文責〉，広島俊男，駒澤正夫，牧野雅彦（以上地殻物理部），須田芳朗（地殻熱部），村田泰章（地質情報センター）

のための参考に供する事を目的としている．

地球の重力場は，地球の形を回転楕円体で近似したものによる重力場と，現実の地球がそれからズレていることによる影響に分けて考えることができる．前者の重力場は，標準重力場の①緯度変化と②高度変化を含む．また後者は，③地球の表層付近（探査の対象となる深度まで）が一様な密度の物質で埋まっているとしたときに期待される重力場の標準重力場からのズレと，④地下の物質分布がその一様な密度と異なっているために生ずる重力異常に分けられる．重力探査は，測定結果から④に相当する重力異常を導いて地下構造を推定しようとするものであり，①-③に対する除去•補正が必要となる．本報告では，この①-③の影響を見積る一方法を定式化する．定式化にあたっては，個々の補正について最悪でも 0.1 m*gal* の精度を確保することを原則的目標とした．

なお，本論では，ジオイド面が地球楕円体面に一致すると考えて議論をすすめ，ジオイドの地球楕円体に対する凹凸の効果は別途考察する．また，フリーエア補正を実測点からジオイド上への重力値の引き直しとする従来の間違った考え方はとらず(萩原，1978)，あくまで実測点高度でのブーゲー異常値の算出を考察し，その手順を議論する．

本論では，ここに提示する重力補正手順による補正等に先立って行うべき前処理について述べた後，標準重力場の緯度変化を示す正規重力式の近似式，重力場の高度に関する補正としてのフリーエア補正・大気補正及び測点が平均海面下となる場合の大地補正，並びに海底面を含む地形の凹凸の影響を補正する地形補正とブーゲー補正について，逐次，計算の方法・手順を論じる．

2．前 処 理

重力探査における重力計の読取値からその測点での重力値を求めるためには，使用した重力計固有の器差補正やドリフト補正が必要である．ドリフト補正のためには重力基準点を起点とした閉ループ測定を行い，ドリフト勾配を求めるが，はからずも重力計に機械的なショックを与えたときに生ずるテア（不規則なドリフト）に対する考慮も必要である．テア発生のおそれのある場合には，基準点から測定をやり直すか，もしくは，直前の測点と基準点との往復測定を行ってテアの影響を見積り，その前後で各々別のドリフト補正を適用する．これらの補正は通常，調査の現地で測定データの妥当性の確認の一環として計算を行う．従って，ここで取扱う標準処理手順にかかる前の前処理として位置づけられる．

また，太陽・月による潮汐力の影響に対する補正には測定時刻の情報が必要であり，これも前処理として別個に計算・補正される．潮汐力の影響としては，

① 潮汐力そのもの（太陽・月の引力と太陽・月・地球系の重心のまわりの公転による遠心力との合力），
② 潮汐力による地球の変形（地球潮汐）とそれに含まれる測点の地球中心からの距離の変化，
③ 海洋潮汐による潮位変動

がある．原則的考え方としては，これら全部に対する補正を潮汐補正と考え，前処理として補正する．③海洋潮汐の影響の補正のためには検潮所の潮位データなどが必要となるが，潮位変動分の海水の引力は，平野部の陸上測点に対して主として水平方向に作用するため重力測定への影響が小さい．従って，海域測定の場合または海岸近くの測点で断崖上のように標高が海面から大きく離れている場合にのみ③海洋潮汐の影響を考慮すればよい．②地球潮汐の影響には地球の剛性率が関与するが，従来の重力連続観測から①潮汐力自体の 0.2 倍程度となることがわかっている(坪井，1979)．また，①潮汐力自体は高々 0.2 m*gal* である．従って，一般的な陸域調査では計算される潮汐力の 1.2 倍の補正のみが実施される．

重力計読取値に対して，器差補正・ドリフト補正及び潮汐補正の前処理を施したものを，ここでは「重力測定値」と呼ぶこととする．

3．標準重力場の緯度変化

一般に地表面での重力は，980 *gal* 程度の値をとるが，地球が偏平な回転楕円体に近い形をしており，その短軸のまわりに自転しているため，緯度が低くなるにつれて小さくなる．地球重力の緯度変化の標準的な値としては，今日では国際的に認められた測地基準系（GRS：Geodetic Reference System）に基づく正規重力式（萩原，1978）が用いられる．正規重力式は，地球の形が回転楕円体でかつその表面が重力の等ポテンシャル面となるように決定されており，1967 年にはじめて国際的に認められた．そこに用いられる測地基準系は，地心引力定数（地球の全質量と万有引力定数との積），自転角速度，赤道半径及び重力ポテンシャルの球関数展開係数の 2 次の項で定義されるが，これらの値はその後の改訂を経て，現在は GRS 1980（友田ほか，1985）が採用されている．

この GRS 1980 に基づいて，正規重力式の近似式を導くと，緯度 ϕ_0 における楕円体面上の正規重力 γ_0 は，

$$\gamma_0 = 978032.68 + 5163.07 \sin^2 \phi_0 + 22.76 \sin^4 \phi_0 \ (\mathrm{m}gal) \qquad (1)$$

で与えられる．この近似式の誤差は，日本周辺の緯度では 0.02 m*gal* 程度以下となる．

ここで本来，緯度 ϕ_0 としては GRS 1980 測地系での緯度を用いなければならないが，国内の地形図は測量法（昭和 24 年　法律第 188 号）に基づいて，いわゆる東京測地系で作成されており，東京測地系と GRS 1980 測地系との相対的関係は定義されていない．しかし，人工衛星測量に基づいた汎世界的な測地系である WGS 72 系と東京系とのズレを見積った SEPPELIN（1974）の結果を参考にすると，東京系の緯度と GRS 1980 系での緯度との差は高々15 秒程度と見積られる．また，緯度 15 秒の差が正規重力値に及ぼす影響は(1)式から 0.4 m*gal* 未満と見積られ，しかも単なるバイアスとして作用するにすぎない．地質調査所重力補正標準手順 SPECG 1988（以下単に SPECG と略記する）では，東京測地系での緯度をそのまま(1)式に適用することとする．

なお，ここで上記の正規重力は，地球の大気を含む全質量が地球楕円体の内側におしこめられたときの重力値を与えていることに注意する必要がある．

4．フリーエア補正・大気補正・大地補正

重力は測点の高度が上昇すると，第一義的には地球の中心から遠ざかるため小さくなる．その変化率は，前章と同様に地球の全質量が地球の中心寄りに凝縮していると考えたとき，正規重力場の垂直勾配（本論では，これをフリーエア勾配と呼ぶ）で与えられる．一方，現実の地球には大気が存在しており，測点よりも外側に質量が分布する．その影響を補正するのが大気補正である．さらに，測点が地球楕円体の表面よりも沈み込んでいる場合には，大気ばかりでなく地殻の一部が測点の外側に分布することとなる．これに対する補正は，後に述べるブーゲー補正の考え方と整合させる必要があるが，ここでは，楕円体表面までは岩石で埋まっておりその外側に大気がある状態が標準的な地球の姿（標準地球モデル）であると考え，その標準地球モデルに対する重力場を考察する．なお，SPECG では東京測地系における標高が GRS 1980 の楕円体面からの高さに一致するものと考える．

フリーエア勾配の楕円体面上での値 β に対する理論式は萩原（1978）が導いており，これに GRS 1980 に基づくパラメータを代入すると，10^{-5} m*gal*/m 未満の微小項を無視して

$$\beta=0.30878-0.00043\sin^2\phi_0\ (\mathrm{m}gal/\mathrm{m}) \qquad (2)$$

が得られる．しかし，フリーエア勾配自体も高度に依存するので，それを高度に関する 1 次式で，すなわち正規重力 γ_N を高度 H_0 の 2 次式

$$\gamma_N=\gamma_0-\beta H_0+\alpha H_0^2 \qquad (3)$$

で表現する．2 次の項は微小となることが予想され，かなり大幅な近似をもちこんでもよいと考えられるので，地球を楕円体ではなく球に近似する．そのとき，地球の自転による遠心力の 2 次係数は 0 となり，地球の引力の 2 次係数は，地球の中心までの距離を合理的な範囲でどのように設定しても 10^{-9} m*gal*/m² 程度しか変化せず，

$$\alpha=0.07\times10^{-6}\ (\mathrm{m}gal/\mathrm{m}^2) \qquad (4)$$

と設定できる．従って，SPECG ではフリーエア補正 F を(2)と(4)の値を用いて，

$$F=\gamma_0-\gamma_N=\beta H_0-\alpha H_0^2 \qquad (5)$$

で定義する．

大気補正を厳密に定義するには，大気密度の高度分布を仮定する必要があるが，実用的な大気補正の式を坪井（1979）が示している．SPECG では，これを踏襲して高度 H_0（単位m）に対する大気補正量 A を，

$$A=0.87-0.0000965\ H_0\ (\mathrm{m}gal) \qquad (6)$$

で与える．ここに，岩石でつまった楕円体の外側に大気が分布する標準地球モデルの重力 γ は，

$$\gamma=\gamma_0-F-A \qquad (7)$$

で表されることとなる．なお，この(6)・(7)式は正の標高に対してのみ適用される．

次に，海底重力計の測定のように標高が負となる場合を考える．このとき，標準地球モデルにおける大気補正は標高 0 m の場合と同じく 0.87 m*gal* となるが，これに加えて測点よりも上方にある地殻の影響を考慮しなければならない．測点よりも上方の質量による引力は，近似的に球殻とみなされるので，よく知られているように全体として 0 になるが，測点に及ぼす地球全体の引力を考えたとき，地球の質量がその分だけ減少したのと同等になる．

SPECG ではその関係を次のように考慮する．

① 標高 H_0（$H_0<0$）にある測点に対し，その直上の楕円体面上の点 P における楕円体の平均曲率半径を R_m とする．

② 点 P とその周辺において地球は半径 R_m の球で十分近似されると考える．（但し，正規重力場は楕円体から導かれたものをそのまま使用する．）

③ 標高 H_0（$H_0<0$）以浅の球殻の体積 V は，

$$V=(4/3)\pi\ \{R_m^3-(R_m+H_0)^3\} \qquad (8)$$

で与えられるので，その密度を ρ，万有引力定数を G としたとき，球殻の全質量が球対称に標高 H_0 以下の深度におしこめられた場合に標高 H_0 の点に及ぼす引力 L は，

$$L=\frac{G\rho V}{(R_m+H_0)^2}$$

$$=\frac{4\pi}{3}G\rho\left(R_{\mathrm{m}}+H_0\right)\left\{\left(\frac{R_{\mathrm{m}}}{R_{\mathrm{m}}+H_0}\right)^3-1\right\} \qquad (9)$$

となる.

④ 正規重力場（フリーエア補正を含む）では，この球殻の質量が測点よりも内側にあるとみなされているので，標準地球モデルに比較してLの分だけ大きく見積られている.

⑤ 従って，標準地球モデルの重力γは，大気補正 A_0 (=0.87 m*gal*) を含めて，

$$\gamma=\gamma_0-F-A_0-L \qquad (10)$$

で与えられる．すなわち，重力測定値に対してLに相当する補正が必要である．この補正を「大地補正」(Lithospheric Correction) と呼ぶ.

大地補正は(9)式で与えられるが，現実的に $|H_0|$ が R_{m} に比して微小であるので，より簡単な近似式を導くことができ，実際の計算においては次式を用いる.

$$L=-4\pi G\rho H_0\left(1-H_0/R_{\mathrm{m}}\right) \qquad (H_0<0) \qquad (11)$$

5．ブーゲー補正

重力測定値を標準地球モデルでの重力値に引き直すためには，地形（水域を含む）の凹凸の影響を補正する必要がある．この補正は従来より，測点の高度までの地形の凹部には（水域にあっては水を排除して）岩石を埋め，凸部は削り取ることに相当する地形補正の作業と，測点高度から楕円体面までの厚さ一定の板状の地形（岩石）の影響を除去するブーゲー補正の作業に分けて実施されている．SPECG でもこれを踏襲する.

地形補正は通常，測点から数 10 km ないし 100 km 程度の有限の範囲について実施されるのが一般的である．地形の凹凸の影響をブーゲー補正と地形補正に分けて除去するという観点からは，ブーゲー補正の範囲は，地形補正の範囲と合わせるべきであるが，ブーゲー補正を無限平板として計算している例がしばしば見うけられる．これは，萩原 (1978) が示しているように，ブーゲー補正において地球の球面の影響を考慮し，それを 100 km 前後の距離範囲で打ち切った部分球殻ブーゲー補正に対する近似計算と考えた方がよい．しかしその場合には，地形補正においても球面の効果を考慮すべきであろう.

SPECG では，後に述べるように地形補正を半径 60 km の円状領域について球面効果を考慮して実施するので，ブーゲー補正も半径 60 km の部分球殻（球帽）として実施する.

標高 H_0 が正のときの部分球殻ブーゲー補正の厳密式は，萩原 (1978) が導いている．標高が負の場合にも適用できるようにその式を拡張することは容易であり，角距離 σ を半径とする円盤状の球殻に対するブーゲー補正Bは，標高 0 の球面の半径を平均曲率半径 R_{m} に等しくとり，

$$t=R_{\mathrm{m}}/\left(R_{\mathrm{m}}+H_0\right) \qquad (12)$$

とおくと，

$$\begin{aligned}B=\frac{-2\pi G\rho R_{\mathrm{m}}}{3t}\Big\{&|1-t^3|-(1-\mu-3\mu^2)\sqrt{2(1-\mu)}\\&+(2-3\mu^2-\mu t-t^2)\sqrt{1-2\mu t+t^2}\\&-3\mu(1-\mu^2)\ln\frac{1-\mu+\sqrt{2(1-\mu)}}{t-\mu+\sqrt{1-2\mu t+t^2}}\Big\}\end{aligned}$$

$$(\mu=\cos\sigma) \qquad (13)$$

が得られる（駒澤，1988 a）．ここで，

$$h=H_0/R_{\mathrm{m}} \qquad [t=1/(1+h)] \qquad (14)$$

とおき，(13)式をhのべき乗に展開して高次の項を無視すると，

$$m=\sin(\sigma/2)=\sqrt{(1-\mu)/2} \qquad (15)$$

を用いて，

$$\begin{aligned}B=-2\pi G\rho R_{\mathrm{m}}\Big\{&|h|\left(1-\frac{h}{4\,m}+\frac{11h^2}{24\,m}-\frac{3mh}{4}+\frac{7mh^2}{8}\right)\\&+h\left(m-h+\frac{4h^2}{3}\right)\Big\}\end{aligned} \qquad (16)$$

となる.

半径 60 km の領域を考えると，mの値は約 0.0047 となるのに対し，hはさらに小さな値となり，富士山頂でも約 0.00059 となる．従って，(16)式の小カッコ内をそれぞれ前から 2 項で近似し，さらに $m\simeq\sigma/2$ の近似をいれると，

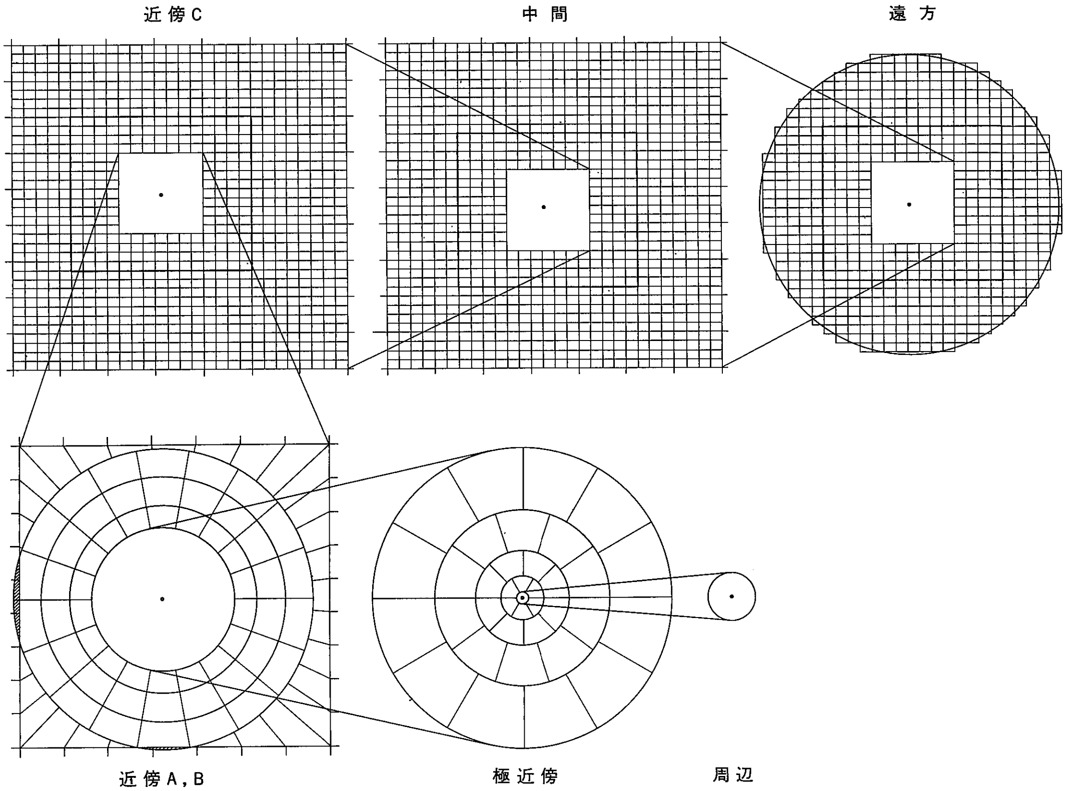
$$\begin{aligned}B=-2\pi G\rho\{&|H_0|\left(1-H_0/2S\right)\\&+\left(H_0/R_{\mathrm{m}}\right)\left(S/2-H_0\right)\}\end{aligned} \qquad (S=R_{\mathrm{m}}\sigma) \qquad (17)$$

となる．SPECG では，S=60×10³ (m) として(17)式によってブーゲー補正値を計算する.

(17)式による近似誤差は，(16)式との比較から，陸域で最大誤差の予想される富士山頂においても 0.015 m*gal* 程度にとどまることがわかる.

6．地 形 補 正

SPECG では半径 60 km の円状領域について球面効果を考慮した地形補正を行う．地形補正のためには，従来より種々の方法が考案されてきているが，補正計算に必要な作業を軽減するため，今日では，国土地理院による KS-110 ファイルなどの標高数値データを利用する方法が一般化している（例えば，広島・須田 (1980)，河野・久保 (1983)，桂ほか (1987)，駒澤 (1988 a)）．しかし，測点近傍の地形については，とくに山岳地域において影響が大きく，より精密な補正が必要となる.



第1図　地形補正の階層区分の模式図

SPECG で採用した方法は，従来より地質調査所で採用され更新されてきた方式に，球面効果（野崎，1981）等を考慮してさらに改良を加えたものである．その内容を模式的に示したのが第1図であり，地形補正を，周辺・極近傍・近傍A・近傍B・近傍C 1・近傍C 2・中間1・中間2・遠方1・遠方2の10段階に区分して，各々について，岩石圏と水圏の計算処理を行っている．また，各区分における補正法を概括したものを第1表に示す．

なお，近傍Bまでの範囲の地形補正の計算にあたっては，緯経度座標が矩形座標になっているものとみなし，緯線・経線の長さは測点の緯度での値を用いる．近傍C以遠については，距離及び矩形区画の面積は楕円体用の近似式（付録1参照）を用いる．

（1）周　辺

測点のまわりの半径 20 m 以内の領域については，測定時のスケッチに基づいて地形をモデル化し，数値積分によって補正値を求める（広島ほか，1978）．また，とくに地形が複雑な場合には，Hammer (1939) にならって円形補正板を用いた地形読取による補正を行う（広島ほか，1983）．この計算は事前に行い，SPECG に対する入力データとする．なお，半径 20 m の範囲内が平地の場合の補正値は，当然0となる．

周辺地形補正の特殊な例としては，トンネル坑内での測定（その点での測点高度と地表面高度とが異なる）がある．その場合には半径 20 m の範囲内についても，①トンネル自体（空洞部分）の影響と，②測点から地表面までの岩盤の影響とを考慮する必要がある．また，後者②については，ⓐ地表が平らな場合の測点と地表面の高度差の影響と，ⓑ地表面の凹凸の影響に分けて考えることができる．SPECG では，ⓐについては次項の極近傍補正に組み込んだ形で処理し，①及びⓑを周辺地形補正と考えて事前の計算によって補正値を与える．但し，一般的には地表までの高度差が地表面の凹凸に比して大きいため，ⓑは無視できる場合が多い．

（2）極 近 傍

半径 20 m から 500 m までの円形領域内については，原則として大縮尺（縮尺5千分の1程度）の地形図を用いて，地形図に円形補正板を重ねて多数の扇形区画の標高を読みとる Hammer (1939) の方法（以下，扇形補正と呼ぶ）を適用するのを基本とする．円形補正板の扇形

第１表　SPECG における地形補正方法の概要一覧

区　分	距離範囲(m)	水平断面形状	使用高度情報	補正方法	備　　考
周　　辺	0—20	円　形	スケッチ	スケッチに基づき数値積分	平地では0とする
極　近　傍	20—70	扇形(1/6)	大縮尺の地形図から読取	円形補正板による標高読取に基づいて扇形柱モデルで計算	平野部では仮想扇形補正を適用する
	70—155	〃 (1/8)			
	155—290	〃 (1/10)			
	290—500	〃 (1/12)			
近　傍　A	500—650	扇形(1/18)	地形メッシュ標高ファイル	仮想扇形補正を適用	各扇形の中央点の標高を，その周囲４点と測点自体の計５点の標高データの加重平均で与える
	650—850	〃			
	850—1050	〃			
近　傍　B	円形と矩形の遷移領域		〃	２つの五面体の引算で近似	
近傍Ｃ１	(１k—２k)	矩　形	〃	角柱モデルを考え，これを第１図の太線の内側に相当する位置では４線質量近似で，その外側に相当する位置では KANE (1962) の方法で近似計算	周辺-近傍Ｃ２に対しては球面効果は考慮しない
近傍Ｃ２	(２k—４k)	〃			
中　間　１	(４k—８k)	〃	平均標高ファイル(中間用)		球面の沈み込み効果を考慮する
中　間　２	(８k—16k)	〃			
遠　方　１	(16k—32k)	〃	平均標高ファイル(遠方用)		
遠　方　２	(32k—60k)	〃			

区画は第１図と第１表に示すとおりである．ただし，平野部では，国土地理院の KS-110 ファイルのデータに海上保安庁水路部の海底地形図から読みとった水深データを追加して作成した地形メッシュ標高ファイルを用いて，仮想扇形補正によって計算する．ここに，仮想扇形補正とは，円形補正板の各扇形区画の中央の点の標高を，地形メッシュ標高ファイルのデータ（計算点を囲む４点）と測点位置の標高から加重平均によって求め，扇形柱の集合で地形を近似するものである（駒澤，1988 a）．

大縮尺の地形図で円形補正板の読取を行うか，仮想扇形補正による計算値を使用するかの判断は，次の基準によっている．

（a）　すでに円形補正板の読取による扇形補正データが与えられている場合は，それを用いる．

（b）　円形補正板の読取による扇形補正データが与えられていない場合には，仮想扇形補正による補正値の計算を行い，その値が 0.2 m*gal* 以下であれば，仮想扇形補正の結果を使用する．

（c）　仮想扇形補正による計算値が 0.2 m*gal* をこえる場合には，新たに大縮尺の地形図から円形補正板を用いて地形の読取を行う．

なお，前項に述べたように，測点位置の地表面高度が測点高度と異なる場合には，高度差に相当する半径 20 m 以内の範囲の地形補正量（前項のⓐ相当分）を加算する．この加算量には，海底（または湖底）での重力測定に対する水圏部分の補正や高層建築物・塔など空中での測定に対する補正を含む．

（３）　近　傍　A

半径 500 m から 1,050 m までの領域については，前項に述べた仮想扇形補正を適用する．

（４）　近　傍　B

近傍Aまでの円形領域と近傍C以遠の矩形領域との遷移領域であり，この領域を第１図に示すように 32 個の四辺形状の区画に区分し，その各々を五面体の引算に近似して計算する．すなわち，外側の矩形の辺上には，合計 32 個の地形メッシュ標高点が位置しているので，その隣接する２点と測点自体とで張られる平面を，当該の四角形状の区画の地形面であると考える．そして，この面と測点を通る水平面で挟まれる地形に対する補正量を，外側矩形で切られる五面体と，内側円形を 32 辺形に近似したもので切られる五面体との引算で与える．内側円形部分は，32 辺形に近似されるためわずかに重複部分を生ずるが，その誤差が十分小さいことは容易に想定される．なお，現実には第１図に斜線で例示したように，「内側円形」が「外側矩形」の外側にはみ出す部分が生ずることがあるが，はみ出した部分で補正量が負として計算に反映されることとなるので，問題は生じない．

五面体による重力効果の計算式は，HAGIWARA (1967) が導いており，これを用いたより実用的な式を付録４に掲げる．

（5） 近 傍 C

KS-110 ファイルの地形メッシュすなわち2万5千分の1地形図を（40×40）に分割した緯度7.5秒，経度11.25秒の区画（以下，基本メッシュと呼ぶ）で数えて，南北36×東西28の領域であり，測点がその中央の（4×4）の基本メッシュ内に入るように設定する．測点を中心とする（9×7）の基本メッシュ区画は，近傍Bまでの補正領域に入るので，近傍Cの区画数は945となる．

地形補正量は，この領域の地形が各基本メッシュに置かれた矩形の柱（4隅の標高の平均値を高さとする）で近似されるものとし，四角柱の重力効果をさらに近似計算することによって求める．その近似計算では，計算時間と近似精度への配慮から，第1図の太線を境界としてその内側（近傍C 1）と外側（近傍C 2）に分けて別の近似式を用いており，近傍C 1では中塚・広島（1988）の4線質量近似で，近傍C 2では KANE（1962）の等断面積扇形柱近似で計算する．

なお，近傍C 2までの範囲内では，地球の球面効果による地面の沈み込みは高々 2 m 程度であり，地形メッシュ標高データの精度（平野部で1 m, 山岳部で10 m単位で読まれている）と比較して有意とは考えられない．従って，その範囲では地球表面を平面とみなし，中間-遠方域に対してのみ球面の沈み込み効果を考慮する．

（6） 中 間

近傍Cの補正領域を，緯度・経度とも4倍に拡大したものを補正領域としている．小区画の大きさは緯度0.5分，経度0.75分であり，計算方法は，球面の沈み込み効果（付録2及び3参照）を考慮する点を除いて近傍Cと同一である．

この補正に使用する標高データは，国土地理院によって作成された平均地形高度ファイルのデータに海上保安庁水路部の海底地形図から読みとった水深データを追加して作成した中間用平均標高ファイルである．

（7） 遠 方

中間補正の領域をさらに緯度・経度とも4倍に拡大したものを基本とし，測点からの距離60 kmで打ち切った領域である．小区画の大きさは緯度2分，経度3分であり，計算方法は中間補正と同様である．使用する標高データは，中間用と同様の手順で作成された遠方用平均標高ファイルである．

60 km圏での打ち切りは，各小区画の中心点が60 km圏内に入るときその区画全体を補正領域に入れ，60 km圏外となるとき区画全体を補正領域外としている．従って，実際の補正領域は第1図に例示したように，半径60 kmの円領域に対して凹凸があるが，その過不足は，合計100個以上の小区画の統計的な平均値として影響を与えるにすぎず，円領域とのズレの影響は無視してよいと考えられる．

7. おわりに

新「重力図シリーズ」の出版にあたって重力の各種補正手順の定式化を行い，SPECG 1988と名付けた．しかしこの補正手順では，超遠方（60 km以遠）についての地形補正・ブーゲー補正が行われておらず，また，ジオイド高補正も考慮外である．

超遠方の地形補正（ブーゲー補正を含む）に関しては，駒澤（1988 b）がその評価を行っている．重力異常（ブーゲー異常）の絶対値をマントル構造等と対比して考察する上では，超遠方地形補正が重要であるが，その補正を全地球にわたって実施すると，地球全体の質量が変化したことに相当する（陸域に対して大洋底の占める比重が大きいため）と考えられ，それに対する配慮も必要となろう．

一方，現実の測量はジオイドとみなされる平均海面を基準として行われるのに対し，正規重力値は正規楕円体面上で与えられ，ジオイド面と正規楕円体面とは一般に一致しない．従って本来は，ジオイド面の正規楕円体面から測った高さに対する一種の高度補正が，重力測定値に対して実施されるべきである．しかし，ジオイドの詳細な形については研究段階であり，国際的に認知されるまでには至っていない．現実のジオイドの形 （RAPP, 1986）としては，とくに短波長で大きな凹凸は知られておらず，波長数100 km以上の超広域的な重力構造の解析に影響を与えるにすぎない．

SPECG では，波長100 km前後までの地殻の地質構造に関連した重力異常分布の抽出・解析を主たる目標に設定し，超遠方の地形及びジオイド高に対する補正は行わないこととした．なお，ここで議論された重力補正は，実際の測点高度でのブーゲー異常値（いわゆるステーションブーゲー異常）の計算手順であり，ジオイド上でのブーゲー異常（リアルブーゲー異常）または一定高度面でのブーゲー異常を求めるには，さらに別のリダクションを行う必要がある．

またSPECGは，とくに地形補正に関して，地形高度情報数値化の現状に束縛されつつ設定したものである．最近では，国土地理院等でより高度な地形情報の数値化が進められている（奥山，1986）．そうした研究が進展し，精密な地形情報データが全国的に利用できる状況に至ったときには，重力補正手順についても改訂が必要となろう．なお，本手順による地形補正の精度の見積りに関し

ては別の機会に検討することとする.

本報告に述べた標準重力補正手順をコンピュータ上で実現するプログラムは，FORTRAN 言語で記述したものを，別途公表する（地質調査所重力探査グループ，1989).

文　献

地質調査所重力探査グループ（1989）　地質調査所重力補正標準手順 SPECG 1988 の処理プログラム．地質調査所研究資料集，no. 137, 49 p.

HAGIWARA, Y. (1967)　Analyses of gravity values in Japan. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo,* vol. 45, p. 1091-1228.

萩原幸男（1978）　地球重力論．共立全書，242 p.

HAMMER, S. (1939)　Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics,* vol. 4, p. 184-194.

広島俊男・須田芳朗（1980）　重力地形補正用地形高度ファイルの編集．物理探鉱，vol. 33, p. 201-218.

――――・――――・駒澤正夫（1983）　精密重力探査における周辺地形補正の計算について．物理探鉱，vol. 36, p. 100-105.

――――・――――・丹治耕吉（1978）　グラフィックディスプレイ装置を利用した重力周辺地形補正の計算について．物理探鉱，vol. 31, p. 313-323.

KANE, M. F. (1962)　A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics,* vol. 27, p. 455-462.

桂　郁雄・西田潤一・西村　進（1987）　KS-110-1 標高データを用いた重力の地形補正計算プログラム．物理探査，vol. 40, p. 161-175.

駒澤正夫（1988 a）　仮想扇形地形による重力地形補正法．測地学会誌，vol. 34, p. 11-23.

――――(1988 b)　超遠方域の重力地形補正と切断誤差．物理探査学会第 78 回学術講演会講演論文集，p. 354-356.

河野芳輝・久保昌之（1983）　メッシュ状平均標高データを用いた地形補正計算の計算プログラム．測地学会誌，vol. 29, p. 101-112.

中塚　正・広島俊男（1988）　角柱の重力異常の 4 線質量による近似計算．物理探査，vol. 41, p. 309-315.

野崎京三（1981）　球面地形補正の計算プログラム．測地学会誌，vol. 27, p. 23-32.

奥山祥司（1986）　CCPS を利用した地形情報の数値化とその利用．国土地理院時報，no. 64, p. 60-66.

RAPP, R. H. (1986)　Spherical harmonic expansions of the earth's gravitational potential to degree 360 using 30' mean anomalies. *Rept. Dept. Geod. Sci. Surv., Ohio State Univ.,* no. 376, 22 p.

SEPPELIN, T. O. (1974)　The Department of Defence World Geodetic System 1972. *Can. Surveyor,* vol. 28, p. 496-506.

友田好文・鈴木弘道・土屋　淳編（1985）　地球観測ハンドブック．東京大学出版会，830 p.

坪井忠二（1979）　重力第 2 版．岩波全書，274 p.

（受付：1989 年 5 月 1 日；受理：1989 年 7 月 11 日）

付録 1．地球楕円体面上の距離及び面積の計算

赤道半径 a，離心率 e なる地球楕円体を考えると，極半径 b は，

$$b=a\sqrt{1-e^2} \tag{A 1}$$

で与えられる．また，緯度 ϕ_* における子午線曲率半径 $R(\phi_*)$，卯酉線曲率半径 $N(\phi_*)$，平均曲率半径 $R_m(\phi_*)$，平行圏の半径 $Q(\phi_*)$ は，それぞれ，

$$R(\phi_*)=a(1-e^2)/(1-e^2\sin^2\phi_*)^{3/2} \tag{A 2}$$

$$N(\phi_*)=a/\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_*} \tag{A 3}$$

$$R_m(\phi_*)=a\sqrt{1-e^2}/(1-e^2\sin^2\phi_*) \tag{A 4}$$

$$Q(\phi_*)=a\cos\phi_*/\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_*} \tag{A 5}$$

で与えられる．この地球楕円体面上の緯度 ϕ_0 の点Pに対応したデカルト座標 (x, y, z) を付図A-1のようにとると，点Pの座標値 (x_0, y_0, z_0) は，

$$x_0=a\cos u_0,\ y_0=0,\ z_0=b\sin u_0 \tag{A 6}$$

$$\tan u_0=(b/a)\tan\phi_0 \tag{A 7}$$

で与えられる．点Pに対して緯度差 ϕ，経度差 λ の点をQとし，その座標値を (x_1, y_1, z_1) とすると，

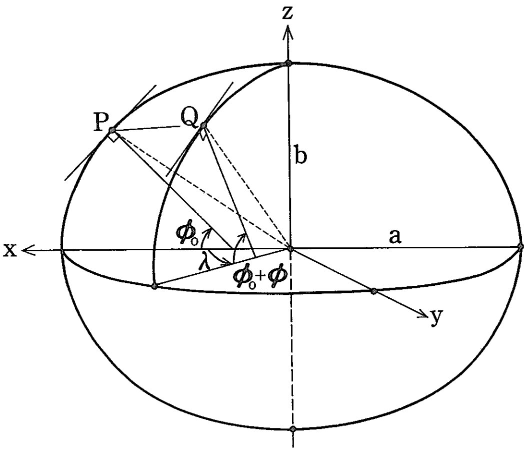
$$x_1=a\cos u_1\cos\lambda,\ y_1=a\cos u_1\sin\lambda,\ z_1=b\sin u_1 \tag{A 8}$$

$$\tan u_1=(b/a)\tan\phi_1\ (\phi_1=\phi_0+\phi) \tag{A 9}$$

となる．従って，線分 PQ の長さを D とすると，(A 1)・(A 6)・(A 8) を用いて，

$$\begin{aligned}D&=\sqrt{(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2+(z_1-z_0)^2}\\&=a[(\cos u_1-\cos u_0)^2+(1-e^2)(\sin u_1-\sin u_0)^2\\&\quad+2\cos u_1\cos u_0(1-\cos\lambda)]^{1/2}\end{aligned} \tag{A 10}$$

が得られる．また，(A 1)・(A 7)・(A 9) より，



付図A-1　地球楕円体と座標系

$$\sin u_0=\sqrt{1-e^2}\sin\phi_0/\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_0},$$
$$\cos u_0=\cos\phi_0/\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_0} \qquad \text{(A 11)}$$
$$\sin u_1=\sqrt{1-e^2}\sin\phi_1/\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_1},$$
$$\cos u_1=\cos\phi_1/\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_1} \qquad \text{(A 12)}$$

が導かれる．

$$f=\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_0}/\sqrt{1-e^2\sin^2\phi_1} \qquad \text{(A 13)}$$

とおいて，（A 3）・（A 11）-（A 13）を用いると（A 10）は，

$$D=N(\phi_0)[(f\cos\phi_1-\cos\phi_0)^2 +(1-e^2)^2(f\sin\phi_1-\sin\phi_0)^2 +2f\cos\phi_1\cos\phi_0(1-\cos\lambda)]^{1/2} \qquad \text{(A 14)}$$

と表される．ここで上式の大カッコ内について，e^2, ϕ, λ に関するべき乗の形に展開し，それらの4次以上の微小項を無視して整理すると，

$$D\simeq N(\phi_0)\ [\phi^2+\lambda^2\cos^2\phi_0-\phi\lambda^2\sin\phi_0\cos\phi_0 -2e^2\phi^2\cos^2\phi_0]^{1/2} \qquad \text{(A 15)}$$

が得られる．

（A 15）において，大カッコ内の第4項を無視すると，卯酉線曲率半径Nを半径とする球での直線距離計算近似式となり，この第4項が回転楕円体の場合の補正項となっていることがわかる．数値計算によって（A 15）の誤差（厳密式による計算との比較による）を見積ると，距離 60 km に対しても 3.5 m 未満，すなわち 60 ppm 未満の誤差であり，地形補正のための距離計算においては，実用上十分な精度といえる．

次に，点Qのまわりの微小な緯経度範囲$\varDelta\phi$, $\varDelta\lambda$ の面積 $\varDelta S$ の近似計算式を導く．この面積は，

$$\varDelta S=R(\phi_1)\ \varDelta\phi\cdot Q(\phi_1)\ \varDelta\lambda \qquad \text{(A 16)}$$

で与えられるので，（A 2）・（A 5）及び（A 3）・（A 13）を用いると，

$$\varDelta S=R(\phi_0)N(\phi_0)\ \varDelta\phi\,\varDelta\lambda\ [f^4\cos(\phi_0+\phi)] \qquad \text{(A 17)}$$

となる．ここで上式の大カッコ内を，e^2, ϕ のべき乗に展開して2次以上の微小項を無視すると，

$$\varDelta S\simeq R(\phi_0)N(\phi_0)\ \varDelta\phi\,\varDelta\lambda(\cos\phi_0-\phi\sin\phi_0) \qquad \text{(A 18)}$$

が得られる．

（A 18）を用いた面積の近似計算による誤差は，点Pからの距離が 60 km までの範囲で 200 ppm 程度以下である．

付録2．球面効果を考慮した地形補正

地形補正における地球の球面効果は，球面の沈み込み効果のみ考慮すれば十分である．このことを明らかにするため，次のモデル（付図A-2参照）を考える．

観測点Pが球の中心から r_0 の距離（高さ H_0）にあり，点Pから角距離 σ だけ離れ球の中心から距離 r（高さ H）の点Qの位置にある微小体積（$r^2\sin\sigma\ d\sigma\ d\tau\ dH$）が，観測点Pに及ぼす重力効果を dT_s とする．ここで，τ は点Pからみた点Qの方位角を表す量である．

付図A-2（a）で明らかなように，PQ 間の距離 s は，

$$s=\sqrt{r^2+r_0^2-2rr_0\cos\sigma} \qquad \text{(A 19)}$$

で与えられるので，微小体積の密度を ρ とすると，

$$dT_s=\frac{(r\cos\sigma-r_0)\rho r^2\sin\sigma\ d\sigma\ d\tau\ dH}{(r_0^2+r^2-2rr_0\cos\sigma)^{3/2}} \qquad \text{(A 20)}$$

となる．ここで，平均曲率半径 R_m を用いて，

$$r=R_m(1+\delta),\ r_0=R_m(1+\delta_0) \qquad \text{(A 21)}$$
$$dV=R_m^2\sin\sigma\ d\sigma\ d\tau\ dH \qquad \text{(A 22)}$$

とおき，

$$w=\sin(\sigma/2) \qquad \text{(A 23)}$$

とすると，（A 20）は，

$$dT_s=\frac{[\delta-\delta_0-2(1+\delta)w^2]\ (1+\delta)^2\rho}{[(\delta-\delta_0)^2+4(1+\delta+\delta_0+\delta\delta_0)w^2]^{3/2}}dV \qquad \text{(A 24)}$$

に帰する．

次に，球面の沈み込み効果のみを考えることにすると（付図A-2（b）），PQ 間の水平距離Dは，

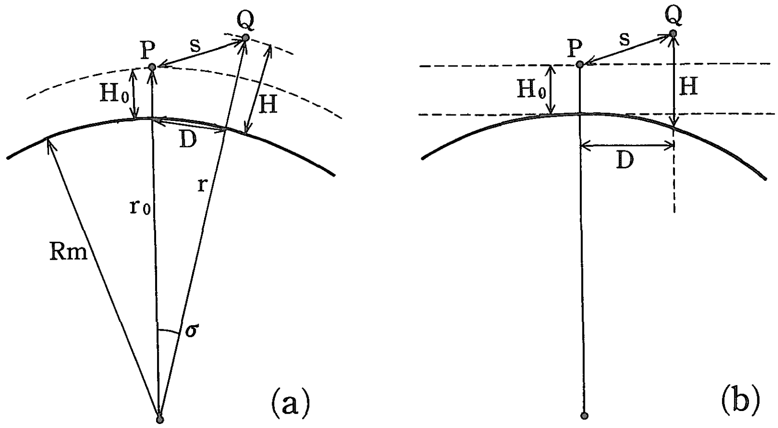
$$D=2\ R_m w \qquad \text{(A 25)}$$

で与えられ，PQ 間の距離 s は，

$$s=\sqrt{D^2+(H-H_0-R_m+R_m\cos\sigma)^2} \qquad \text{(A 26)}$$

となる．また，点Qの位置の微小体積は（$DR_m\ d\sigma\ d\tau\ dH$）で表されることとなり，これが点Pに及ぼす重力効果 dT_L は，

$$dT_L=\frac{2(H-H_0-R_m+R_m\cos\sigma)\rho R_m^2 w\ d\sigma\ d\tau\ dH}{[D^2+(H-H_0-R_m+R_m\cos\sigma)^2]^{3/2}}$$



付図A-2 球面効果を考慮した地形補正の計算

(A 27)

となる．ここで，$H-H_0=r-r_0$ であるから，(A 21)-(A 23) を用いて (A 26) は，

$$dT_{\mathrm{L}}=\frac{(\delta-\delta_0-2w^2)\rho/\cos(\sigma/2)}{[(\delta-\delta_0)^2+4(1-\delta+\delta_0)w^2+4w^4]^{3/2}}dV \qquad (\mathrm{A\ 28})$$

と書ける．

ここで，δ，δ_0 及び w は地形補正に関する限り微小な量であるから，(A 24) と (A 28) の比をとり，微小項 (相対的に 2 次以上の項) を無視して整理すると，

$$dT_{\mathrm{s}}/dT_{\mathrm{L}}\simeq 1-2\delta p \qquad (\mathrm{A\ 29})$$

$$p=\{2w^2-(\delta-\delta_0)^2\}/\{4w^2+(\delta-\delta_0)^2\} \qquad (\mathrm{A\ 30})$$

従って，

$$dT_{\mathrm{L}}/dT_{\mathrm{s}}\simeq 1+2\delta p$$

すなわち，

$$dT_{\mathrm{L}}-dT_{\mathrm{s}}\simeq 2\delta p\ dT_{\mathrm{s}} \qquad (\mathrm{A\ 31})$$

となる．

p の値 (A 30) は，w^2 と $(\delta-\delta_0)^2$ との大小関係により，(−1)-(+1/2) の範囲内となるので，(A 31) より，dT_{s} を dT_{L} によって近似することによる誤差 (比率) は，最大でも 2δ 程度であることがわかる．

現実の地形補正においては，一般に，

$$(\delta-\delta_0)^2 \ll w^2$$

$$|\delta|<1/1000$$

であるので，近似誤差は 1/1000 未満となる．球面効果の現われる遠方-中間域の地形補正量は，現実的に 100 m*gal* をこえることはないので，1/1000 の精度は 0.1 m*gal* の精度以上に相当する．従って，球面地形の効果は，球面の沈み込み効果のみを考慮すれば十分である．

付録 3．地球楕円体面を球面で近似することによる高さの誤差

付図A-1 において，点Pにおける平均曲率半径 R_{m} を半径とする球面が，点Pにおいて地球楕円体に接している状態を想定する．このとき，その球面の中心点Cの座標 $(x_{\mathrm{C}}, y_{\mathrm{C}}, z_{\mathrm{C}})$ は，(A 6) を用いて，

$$x_{\mathrm{C}}=x_0-R_{\mathrm{m}}\cos\phi_0,\ y_{\mathrm{C}}=0,\ z_{\mathrm{C}}=z_0-R_{\mathrm{m}}\sin\phi_0 \qquad (\mathrm{A\ 32})$$

となる．従って，中心点Cから点Qまでの距離 R_{Q} は，(A 8) をも用いて，

$$\begin{aligned}R_{\mathrm{Q}}&=[(x_1-x_0+R_{\mathrm{m}}\cos\phi_0)^2+y_1^2\\&\quad+(z_1-z_0+R_{\mathrm{m}}\sin\phi_0)^2]^{1/2}\\&=R_{\mathrm{m}}\left[\left(\frac{x_1}{R_{\mathrm{m}}}-\frac{x_0}{R_{\mathrm{m}}}+\cos\phi_0\right)^2+\left(\frac{y_1}{R_{\mathrm{m}}}\right)\right.\\&\quad\left.+\left(\frac{z_1}{R_{\mathrm{m}}}-\frac{z_0}{R_{\mathrm{m}}}+\sin\phi_0\right)^2\right]^{1/2}\end{aligned} \qquad (\mathrm{A\ 33})$$

で与えられる．ここで，$(x_1/R_{\mathrm{m}})\cdot(y_1/R_{\mathrm{m}})\cdot(z_1/R_{\mathrm{m}})$ の各々について，e^2, ϕ, λ に関するべき乗に，(x_0/R_{m}) と (z_0/R_{m}) については e^2 のべき乗に展開して，3 次以上の項を無視し，(A 33) に代入して整理すると，

$$R_{\mathrm{Q}}\simeq R_{\mathrm{m}} \qquad (\mathrm{A\ 34})$$

となる．(A 34) は，地球楕円体面は，局所的にはその場所の平均曲率半径を半径とする球面で近似されることを示している．

この近似によって生ずる高さの誤差は，厳密式 (A 33) との比較で見積られ，点Pからの距離が 60 km までの範囲では，1 m 未満の誤差となる．

付録４．地形補正に用いる各種形状の質量分布による重力効果

SPECG において地形補正に用いている地形モデルに対する重力理論式を，以下に掲げる．各パラメータは当該図を参照のこと．

①線質量（付図A-3）［断面積 S の柱を線に凝縮］

$$g=-G\rho S\left(\frac{1}{\sqrt{D^2+h_1^2}}-\frac{1}{\sqrt{D^2+h_2^2}}\right)$$

②扇形柱（付図A-4）

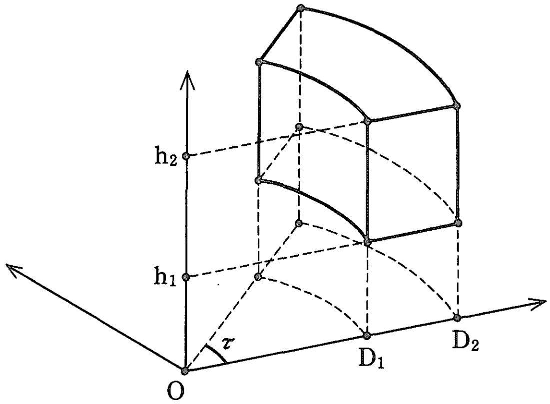
$$g=-G\rho\tau\left(\sqrt{D_2^2+h_1^2}-\sqrt{D_1^2+h_1^2}-\sqrt{D_2^2+h_2^2}+\sqrt{D_1^2+h_2^2}\right)$$

③五面体（付図A-5）

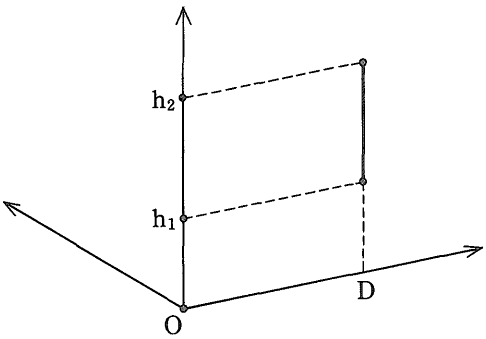
$$g=-G\rho x\left[\ln\left(\frac{\sqrt{x^2+y_2^2}+y_2}{\sqrt{x^2+y_1^2}+y_1}\right)-\frac{1}{\sqrt{1+b^2}}\cdot\ln\left(\frac{\sqrt{x^2+y_2^2+h_2^2}+y_2\sqrt{1+b^2}+h_c}{\sqrt{x^2+y_1^2+h_1^2}+y_1\sqrt{1+b^2}+h_c}\right)\right]$$

$$h_c=\frac{h_1y_2-h_2y_1}{y_2-y_1}\cdot\frac{b}{\sqrt{1+b^2}}$$

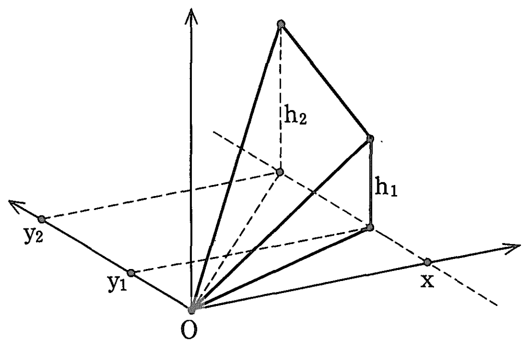
$$b=\frac{h_2-h_1}{y_2-y_1}$$



付図A-4　扇形柱モデル



付図A-3　線質量モデル



付図A-5　五面体モデル