測地成果2000
－測地成果2000の概要－
Geodetic Coordinates 2000
－The Outline of the Geodetic Coordinates 2000－

測　地　部　　野田沢雪夫
Geodetic Department Yukio NOTAZAWA

要旨

測地部では，国土地理院技術協議会の下に設置された基準点体系分科会の提言に基づき，21世紀の位置の基準となる，新しい測地基準点成果「測地成果2000」の公開のための準備を進めている。「測地成果2000」の水平位置は，GPSの連続観測を行う電子基準点を骨格点として，最新の観測値で順次再計算されるため現在の基準点成果の歪みの多くが解消されることになる。更に，「測地成果2000」は，世界標準の座標系であるITRF系と楕円体はGRS 80楕円体を用いて算出される。「測地成果2000」は，近年のGPSやGISの位置情報の測定・利用技術の発達により，従来の測量・地図分野だけでなく，ナビゲーションやポジショニング等位置情報を必要とする社会の様々な分野での利用が期待される21世紀の位置の基準である。

垂直位置については，その基準に変更はないが最新の観測値で再計算される。標高は，実際の重力値で補正を行った正標高が採用されるため，GPSから求める標高と整合がとれることになる。

1　はじめに

地球上の位置を経度・緯度で表すための基準を測地基準系（測地系）と言う。我が国の測地系は，「日本測地系」と呼ばれ明治政府が近代地形図作成のためにその基礎を築いたものであり，構築以来百年以上経った現在の高精度な測量や位置情報ニーズの多様化に，その役目を十分に果たすことが困難な状況になりつつある。そこで，国土地理院では，平成元年度国土地理院技術協議会の下に基準点体系分科会を設置し，21世紀に向けて日本の基準点体系のあるべき姿の検討を開始した。平成５年３月同分科会より新基準点体系の望ましい将来像が示され，その基本方針に沿って準備が進められてきた。特に，新基準点体系のインフラストラクチャとなるGPSの連続観測を行う電子基準点やVLBI観測局等の整備が進み，新基準点体系構築の実現に向けて大きく前進することとなった。このため，平成９年３月基準点体系分科会（Ⅱ）が設置され，新基準点体系の実現に向け具体的な検討が行われた。

その結果，「測地成果2000」という，日本の新しい測地系による新しい基準点成果を公表することとなった。本報告では，各分科会等での報告書を基に「測地成果2000」の概要を紹介する。

2　分科会等の報告概要

2.1　基準点体系分科会

平成元年度に設置された基準点体系分科会は，21世紀の新しい基準点体系のあるべき姿が検討され，その結果が平成５年３月に報告書としてまとめられた。

同報告書によれば，理想とする基準点体系とは，位置に関する情報を，24時間リアルタイム又は準リアルタイムで，日本全国どこでも，豊富な種類の情報を必要な精度で，ネットワークにより提供可能な体系であるとしている。そして，この理想の基準点体系の実現に向けて，今後10年間に実施すべきことが次のように述べられた。

2.1.1　基準点網

基準点体系の骨幹をなす基準点そのものの構成である基準点網は，全国に設置された少数の電子基準点と，整理された標石基準点で構築する。

１）電子基準点

基準点網の骨格とするために，GPS連続観測点である電子基準点を全国に約50点（点間距離200Km）設置する。

２）標石基準点

従来の一～三等三角点約38,700点及び一～三等水準点約25,800点の標石基準点を利用目的，観測精度，経歴等により分類・再構築する。

なお，四等三角点標石の物理的な維持は行わず，当分の間は必要に応じて新基準点体系下で新設をしていくが，電子基準点を利用した測量が普及した時点で，四等三角測量（基準点測量）の見直しを行う。

(1)　定期的に観測を行い，成果更新も行う基準点。
　①　三角点：約3,200点
　②　水準点：約11,400点

(2)　当面観測は行わないが，成果更新は行う基準点。
　①　三角点：約35,000点
　②　水準点：約9,300点

(3)　当面観測も成果更新も行わない基準点。
　①　三角点：約500点

② 水準点：約5,100点

3）平成成果の構築

精密測地網一次，二次基準点測量等の改測結果又は設置当時の観測値を使用して再計算し，2001年には新成果を公表する。この成果を「平成成果」と呼ぶこととする。

2.2　平成成果構築検討委員会

基準点体系分科会の提言に基づき，測地部では，平成5年度に平成成果構築検討委員会を設置して，2001年までに平成成果の公表を目指して技術的な検討が行われた。平成7年3月に平成成果の具体的構築方法等が次のように示された。

2.2.1　平成成果の枠組み

1）三角点

(1) 基準座標系は，現行の日本測地系（ベッセル）とし，世界測地系（ITRF系）も併せて求め，相互に変換が可能な二つの成果とする。

(2) 日本測地系については，社会的混乱を最小限にするため，測量法第11条に定められた楕円体原子及び測量法施行令第2条に定められた原点経緯度数値はそのままとし，法令をなるべくいじらない立場をとる。

実際上は，一次基準点網と経緯度原点とが結合されていないため，「東京大正」測点の実用成果を固定点とし，測地網の規正のため方位角はVLBI観測値を使用する。この場合，原方位について政令を改める必要がある。

(3) ジオイド高＝0mの点は，「東京大正」測点とする。また，世界測地系（ITRF系）については，座標系の中心を地球重心に合わせるものとする。

(4) 成果交付等で提供する主な情報は，次のとおりとする。

① 日本測地系
- 座標値
- 標高
- ジオイド高

② 世界測地系（ITRF系）
- 座標値
- 楕円体高
- ジオイド高

2）水準点

(1) 政令に定める水準原点の数値は変えない。

(2) 現在の成果値が大幅に変わらないように固定点を現日本水準点と決めて平均計算を行う。

2.2.2　平成成果構築の基本方針

1）三角点

(1) 水平位置

① VLBI，電子基準点及び高度基準点測量により取り付けられた一次基準点のITRF系座標値を算出する。

② 一次基準点測量の辺長データをGRS80楕円体面に投影する。①の一次基準点を固定点として，他の一次基準点も含めた全国網平均計算を行い，水平座標を求める。

③ 一次基準点を固定点として，二等三角測量観測データを用いて，網平均計算を行い，一次基準点として観測されなかった二等三角点の水平座標を算出する。

④ 上記で決定された一，二等三角点（一次基準点に格上げされている三等三角点も含む。）を固定点として，二次基準点測量及び三等三角測量観測データを用いて，網平均計算を行い，三等三角点の水平座標を算出する。

⑤ ITRF系座標値を日本測地系座標値に変換する。この場合の変換パラメータは，一等三角点「筑波原点」で決定された数値を用いる。

(2) 標高

① 一次及び二次基準点測量の際，取り付けられた測標水準点（三角点）の標高を最新の水準点成果によって算出する。

② 測標水準点を固定点として，最新の観測データを用いて，網平均計算を行い，一，二，三等三角点の標高を算出する。

(3) ジオイド高

平成成果構築に使用するジオイド高は，天文ジオイド（西，1981）を用いる。ただし，北海道の知床半島地域については，ジオイド93（黒石，1993）を用いるものとする。

2）水準点

① 水準原点を固定して，最新の水準測量データによって網平均を行い，一等水準点の標高を算出する。

② ①で得られた一等水準点の標高を固定して，①に含まれない一等水準点及び路線の見直し整理された二等水準点について補間法による調整計算を行い，標高を算出する。

2.3　基準点体系分科会（Ⅱ）

平成成果構築検討委員会で「平成成果」構築の具体的枠組みが示され，その方針に沿って準備が進められていた。特に，平成成果構築の骨格点となる電子基準点は，平成5年3月の基準点体系分科会の報告では50点の設置を計画したが，平成5年度補正予算で既に約100点の設置が完了した。平成6年6月策定の基本測量長期計画（第五次）で640点の設置が計画された。しかし，その後の補正予算等により，平成9年度までにこの設置計画点数を大幅に上回る947点が設置された（表－1参照）。世界的にもに例を見ないこの電子基準点網の実現により，平成成果は実現に向けて大きく前進することとなった。

一方，GPSは，測量のみならずカーナビを始めとして社会の様々な分野で普及するものと予想され，特に，

国際間での移動を必要とする分野では，世界測地系の重要性が増すものと思われる。

表－1　電子基準点の年度別設置点数

平成4年度	平成5年度	平成6年度	平成7年度	平成8年度	平成9年度
点 6	点 104	点 100	点 400	点 277	点 60

測地系に関する国際的な動向としては，国際民間航空機構（ICAO），国際水路機関（IHO），国連アジア・太平洋地域地図会議の国際機構が世界測地系の採用を加盟国に勧告している。日本でも航空・航海の分野で世界測地系への移行が始まっている。更に，アメリカ，カナダ，北欧諸国及びオーストラリアなど世界測地系を採用する国が増えている。

平成成果の基本方針は，あくまでも現行の日本測地系（ベッセル）での，基準点成果の高精度化であり，世界測地系（ITRF）での座標値は二次的なものとされていた。しかし，このような現状を鑑みて，基準座標系の選定及び電子基準点を骨格網とする基準点体系の設計等を再検討することを目的として平成9年3月基準点体系分科会（Ⅱ）が設置された。その検討結果が平成10年3月に報告された。同報告によれば日本の新しい測地系は，測量法の改正を伴う世界測地系に準拠したものに変更することになった。この新しい測地系を「日本測地系2000」（JGD 2000＝Japanese Geodetic Datum 2000），これにより求められる基準点成果を「測地成果2000」という，21世紀の位置の基準にふさわしい名称に変更された。

3　測地成果2000の概要

測地成果2000は，測地系がベッセル楕円体に基づいている現行の日本測地系から世界測地系に準拠した測地系に変更される以外は，平成成果の枠組みと基本的には同じである。

3.1　日本測地系2000の要件

新しい日本の測地系「日本測地系2000」は，次の要件を目標として構築することとなった。

①　科学的合理性のある測地系

現代の測地学，天文学，地球物理学の見地に基づいた正確な準拠楕円体と座標系に準拠する測地系とする。

②　国際性のある測地系とする。

国際的機関によりその使用が推奨されている世界測地系に準拠した測地系とする。

③　高精度な測地系

VLBI，GPS等の最新の宇宙測地技術を用いて，新たに全国一様に高精度な位置座標値を求める。

④　維持更新が容易な測地系

常時観測を行っている電子基準点とこれを補完する最小限の三角点で構成され，維持管理の容易な測地系とする。

⑤　利用しやすい基準点体系

電子基準点の受信データ等も含め，通信を利用するなど，従来より多様で効率的な方法で情報公開を行う。

3.2　測地成果2000の骨子

測地成果2000は，前記の要件を満たした日本測地系2000により求められる基準点成果で，21世紀の測量や地図の基準だけでなく，ナビゲーション等の位置情報を必要とする様々な分野での利用が期待できる。特に，測地成果2000は，世界測地系に準拠しているため，GPSを用いた各種応用技術への対応を容易にするとともに，国際的な位置情報への対応が容易となる。

1）位置表示

①　水平位置

現行の日本測地系と同じく準拠楕円体上の地理学的経緯度とする。

②　垂直位置

現在と同じく平均海面からの鉛直距離で表す。ただし，現在の標高は標準重力値を用いて算定（正規正標高）されるが，GPSを用いた標高算出に必要なジオイド高は，実測重力値を用いて算定されている。今後，GPS測量の普及を考えると，標高算出のための重力値は実測値を使用すべきである。また，正規正標高では，測量路線の違いによって標高値が異なる場合もある。このため，従来の標準重力値を用いて計算処理された「正規正標高」から実測重力値を用いて計算処理する「正標高」に変更する。

2）座標系

①　座標系は，世界測地系の一つである国際地球基準座標系（ITRF系）の1997年1月時点で最新のもであるITRF 94を採用した。

②　座標値算出のためのデータの元期は，1997. 0（1997年1月1日0時世界時）とする。

③　1997. 0における3点のVLBI点の三次元座標値をITRF94系において表－2のように固定する。

なお，表－2の3点を固定点に選んだ理由としては，新十津川，鹿島は，固定観測局として定期的に観測されている，特に鹿島は国際観測網に含まれた点である。海南は，観測が1回のため元期を合わせることができないが，西日本に固定点が必要であり，地殻変動の影響が少ないと思われるため採用した（平成9年度末現在）。

表－2　VLBI点の三次元座標値

	新十津川	鹿　島	海　南
	m	m	m
X	-3642139.6683	-3997892.2752	-3751040.3551
Y	2861494.7501	3276581.2676	3721052.3198
Z	4370358.9025	3724118.2304	3560816.7309

2）－1　国際地球基準座標系（ITRF）

国際地球基準座標系（ITRF: International Terrestrial Reference Frame）は，国際地球回転観測事業（IERS）が各種の宇宙測地技術によって構築維持されている座標系で1989年より発表され，常に最新のデータを使って更新されている。

ITRF系は，VLBIやGPSなどの宇宙測地観測を用いて各解析センターが計算した観測局位置及び速度のセット（SSC: Sets of Station Coordinates）を組み合わせて以下のように平均したものである。

・各SSCを共通のエポック（t_0）に整約する。
・t_0において最小二乗法推定を行い，ITRF局の位置を算出する。ITRFと各SSCの7つの変換パラメータも同時に計算する。

一般に測地系は①座標軸の方向，②原点，③スケール，④時間変化によって定義される。

ITRF 94の定義は下記のようになる。

①　座標軸の方向

ITRF系は相互に回転がないように定義されており，その意味でITRF 94の座標軸は，1998. 0におけるITRF 92と平行になるように制約されている。

②　原点

SLRとGPSのSSCの原点移動量を重み付き平均したものでITRF 94の原点を定める。

③　スケール

VLBI，SLR，GPSの重み付き平均からスケールが固定される。

④　時間変化

速度場は，標準的なプレート運動モデルであるNNR-NUVEL-1Aモデルと矛盾しないように，1988. 0と1993. 0の局位置の差より計算されたものである。

ITRF 94の計算に使われたSSCには，104のVLBI局，62のSLR局，60のGPS局，52のDORIS局が含まれている。

なお，世界測地系として採用を検討すべき対象としては，GPSの運用のために米国国防省が構築維持しているWGS 84があるが，①日本を含む国際協力によって構築されている，②高精度である，③公開性が高い，④WGS 84がITRF系に接近しつつある等の理由により，ITRF系を採用することとなった。実際，WGS 84（G 873）とITRF 94の基準座標系の実現は5cmレベルで一致しており実用的差はないといわれている。なお，G 873とは，基準座標の変更をGPS Week 873（1996年9月29日）で示したものである（Slater and Malys，1998）。

3）準拠楕円体

地理学的経緯度を求めるための準拠楕円体は，現在もっとも信頼性の高い楕円体として，国際測地学・地球物理学連合（IUGG）及び国際測地学協会（IAG）が1979年に公式に採用を勧告しているGRS 80楕円体（Geodetic Reference System 1980 Ellipsoid）を採用する。

GRS 80楕円体の原子は

・長半径：6378137.00m
・扁平度：1/298.25722101

である。

4）基準点網

①　水平位置：電子基準点・三角点
②　垂直位置：水準点（高精度），電子基準点・三角点（低精度）

5）測量の方法

①　水平位置：VLBI・GPSによる三次元測量，測距儀による距離測量，経緯儀による角観測。
②　垂直位置：直接水準測量，VLBI・GPSによる三次元測量，間接水準測量。

6）基準点成果の計算方法

(1)　水平位置

①　電子基準点（骨格点）
・ITRF 94座標値のVLBI点（新十津川，鹿島，海南）を固定して，GLOBK（GLOBal Kalman filter VLBI and GPS analysis program）で電子基準点（595点）及び東京大正測点成果を算出。
・他の電子基準点については，周囲の電子基準点3点以上を固定して算出

②　一次基準点（一等～二等三角点の一部約3,000点）
・電子基準点と取り付け観測されている一次基準点（高度基準点約500点）は，電子基準点を固定して三次元網平均。
・その他の一次基準点は，電子基準点と取り付け観測を行った一次基準点を固定してGRS 80楕円体上でBL網平均（実際の計算はBessel上で行ったが，その後GRS 80上でも計算し検証することとなった）。

③　二次基準点（二等～三等三角点約3,000点）

一次基準点を固定して，小地域毎にＢＬ網平均又は

三次元網平均。

④　その他の二等～三等三角点

一，二次基準点を固定して，震災等の復旧測量又は，設置当時の観測値で各地区毎にＢＬ網平均。

⑤　四等三角点

四等三角点については，実際の観測値を用いての改算は，６万点を上回る大量点それもデータ未整備のものを再処理していくことは非常に困難である。このため，三等三角点以上の三角点約38,000点の変動量を用いて，変動モデルを作成し，四等三角点の座標に応じて変動量を推算するパラメータ方式により処理することとなった。

⑥　ジオイド高

楕円体への投影は標高にジオイド高を加味した楕円体高を用いる。ジオイド高は，「日本のジオイド96」を用いる。

⑦　目標精度

各基準点の目標精度は表－３のように設定する。

なお，一次，二次基準点の成果については，最新の観測値を用いるが，観測期間は20数年に渡るため，その間の地殻変動の影響は避けられない。その他の二等～三等三角点の成果は，設置当時の観測値を用いるため，地殻変動の影響は解消されないが，コンピュータで平均計算されるため，誤差の調整が不十分なために生じた歪みの多くが解消されるものと考える。

表－３　各基準点の目標精度

	点間距離	絶対精度	相対位置精度
VLBI	1000Km	1 cm	1×10^{-8}
電子基準点	25	3	1×10^{-7}
一次基準点	15	—	2×10^{-6}
二次基準点	8	—	2.5×10^{-6}
その他の点	2	—	5×10^{-6}

⑵　垂直位置

①　一等水準点（骨格点）

昭和62年度から平成８年度までの観測値で水準原点一点固定による全国同時網平均。

②　その他の水準点

一等水準点（骨格点）と最新の観測値から補間法による。

③　目標精度

測量方法を変えないため現行と同様である。

以上が基準点体系分科会（Ⅱ）で示された測地成果2000の概要である。なお，同分科会では，三角点の標高と平面直角座標系の取り扱いについては特に触れられていない。このため，平成10年度に設置された測地成果2000導入に関する院内各部の横断的組織である測地成果改定連絡会議及び，測地部内の測地成果2000構築推進会議において次のような論議がなされた。

◎三角点の標高

・水平位置算出に影響を与えるほどの標高の誤差が認められない。
・隣接三角点間の成果の大部分は整合している。
・ＧＰＳ測量とジオイド高から約20cmの精度で標高が求められる。

等の理由により，三角点の標高は測地成果2000の枠組みとは分離して検討する。

◎平面直角座標系

①　平面直角座標系の定義

平面直角座標系の投影法，座標系数及びその精度等の定義は，現在の定義を踏襲したい。

その理由としては，新基準点体系にふさわしい高精度な平面直角座標系が望ましいという意見もあるが，この場合座標系の適用範囲を狭める必要があり，座標系の個数が相当増加することになる。座標系の個数が増加すると，座標系境界が多くなり作業効率上不適と考えられる。高精度を要求する測量の場合は，球面で計算処理を行うことで対処ができると考える。

②　平面直角座標系の原点位置

平面直角座標系の原点位置は，選択肢としては①日本測地系2000上で現行と同じ座標原点数値の位置に移動する（以下「座標固定」と言う。），②現在の座標原点数値の位置に固定する（以下「地上固定」と言う。）がある。しかし，次の理由により座標固定を採用したい。

・座標系設定のための計算が不要。
・座標原点数値に端数が無い（地上固定は10秒前後の端数が付く）。
・新旧の座標値の差が大きく（座標固定は約400ｍ前後，地上固定は最大で約３ｍ），新旧どちらの座標値か判別容易。
・新旧の座標値の差の大小はあるが座標固定，地上固定とどちらを選んでも，変更に伴う作業量は同じであり，数学的，手法的にすっきりしている座標固定を選択。
・平面直角座標系に関する政令等の改正不要。

③　座標軸の名称

近年，情報処理，数学関係者等測量業界以外の多くの位置情報ユーザーの出現により，ＸＹ座標値の取り違いによる間違いも起こっている。このため，現行の平面直角座標系との違いを強調するためにも又，測地

成果2000の導入を認知させるためにも座標軸名を，南北方向をＮ軸，東西方向をＥ軸とする方向で検討された。しかし，

・各種の測量に関する教材，作業規程，成果品，プログラム等の改訂。

・座標値記述の政令の改正

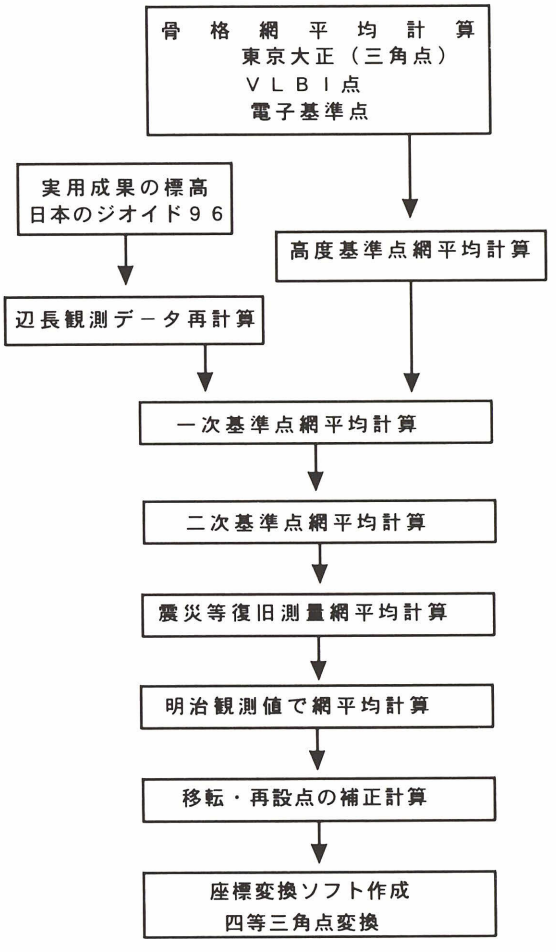
等の変更に伴う経済的負担及び位置情報を必要としている分野への影響が大きいため，負担と便益を勘案し従来どおりの座標軸名としたい。

5　測地成果2000計算工程

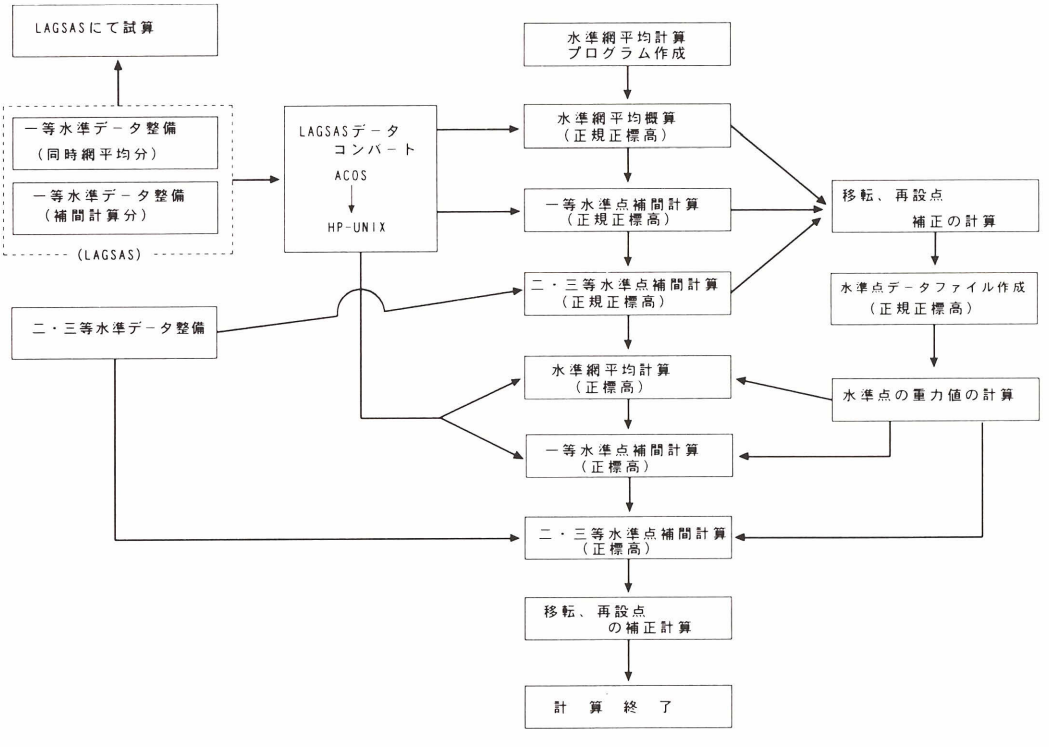
測地成果2000（平成成果）公開のための，データ整理等の準備作業は平成５年度から開始され，平成８年度から計算処理が開始された。詳細な計算手法等は別の機会に報告することとし，水平位置と鉛直位置の計算工程を図－１，２に示す。

6　測地成果2000への期待

測地成果2000が導入されると，測地系の変更や改算による基準点網の歪みが解消されるため，全ての三角点の座標値は400m前後変化することになる。このため測量の分野はもちろん，位置情報を利用している様々な分野でもこれまでの方式を変更したり，既存の資料等を訂正したりする必要がある。しかし，全国の947点の電子基準点を骨格網として算出された測地成果2000の実現は，世界測地系に基づき且つ高精度であるため，今後のGPSの普及とともに測量の分野やその他の位置情報を必要とする分野で大きな効果が期待できるものと考え



図－１　水平位置計算工程



図－２　鉛直位置計算工程

る。

1）電子基準点利用による測量効率化による測量費用縮減

電子基準点を与点として測量を行えば，従来では必要であった与点での測定が省略される。

2）信頼度の高い国家基準点の活用による測量費用縮減

一般測量においては，歪みの除去により，測量精度に見合った結果が保証される。現在のような点検測量や地域による精度の不統一はなくなる。土地利用計画や都市計画を策定するにあたっても基本となる測量がしやすくなり，事前に意図した精度で測量結果を求めることが容易になる。

3）世界測地系への変換の負担解消・利用範囲の拡大

GPSなどの宇宙技術が広く，位置決定やナビゲーションに使われれば，出力される位置情報を直接使用できるため省力化に通じる。また，得られた位置データを応用する場合でも，統一された基準に拠って互換性が確保されていれば容易であり，利用範囲を広げることができる。

国際的には航空・航海分野での測地系の統一化が先行しており，陸域においても整合がとれたものにすればナビゲーションをスムーズに行うことができる。また，地球地図のようなグローバルデータとの共有が可能になり，国際協力や国際ビジネスの場においても有利な環境を整えることができる。

4）安全性の向上による社会的費用の縮減

世界測地系で統一されれば，ローカル系への変換の際に起こりうる間違いの可能性を低くすることができ，ナビゲーションでの安全性の向上につながる。

6　おわりに

昭和の時代にも測地成果の大規模な改正の必要性は議論されたが実現迄には至らなかった。その理由として，①社会的影響の大きさに見合うメリットが感じられなかった，②地震国日本においては一度改正しても又，再改正する事態になりかねない等が考えられる。しかし，社会の様々な分野でのGPSの普及及び国土地理院が全国展開した電子基準点は，これらの障害を緩和することとなったため「測地成果2000」の公開が可能となった。今後，測量法改正後公開することとなる「測地成果2000」の一般社会への導入が円滑に行われることを期待する。

参　考　文　献

国土地理院技術協議会基準点体系分科会　最終報告（平成５年３月）
国土地理院測地部平成成果構築検討委員会　報告書（平成７年３月）
国土地理院技術協議会基準点体系分科会（Ⅱ）　中間報告（平成９年10月）
国土地理院技術協議会基準点体系分科会（Ⅱ）　最終報告（平成10年３月）
測地部測地第二課　測地成果2000整備状況，測地成果2000構築推進会議資料（平成10年８月）
測地部測地第三課　測地成果2000正規正標高計算の概要，報告書（平成10年12月）
Slater, J. A. and S. Malys (1998): WGS84-Past, Present and Future, "Advances in Positioning and Reference Frames", IAG Symposia 118, 1-7, Springer.