

(1) 平成30年度終了特別研究課題 終了時評価【審議】

②精密重力ジオイトに基づく高さ基準系構築に関する研究【審議】

○委員長 それでは、次の議題に移ります。(1) ②精密重力ジオイトに基づく高さ基準系構築に関する研究について、国土地理院から御説明をよろしくお願いいたします。

○発表者 それでは、御手元の説明資料に従いまして、本研究の概要と研究成果につきまして御説明をさせていただきます。

資料2-3をご覧ください。本研究は、研究期間が平成28年4月から31年3月までの3年間で実施しております。予算は2,473万7千円となっております。

まず、本研究の背景から御説明いたします。日本の標高体系は、東京湾の平均海面を基準面とし、全国の路線を水準測量することによって測定・維持管理されてきました。全国に水準点は約1万7,000点ございます。日本は御存知のとおり、地殻変動によって常時標高が変化しておりますので、国土地理院では標高の時間変化を補正するため、10年以上の時間をかけて全路線を水準測量し、再測を続けてきました。

しかしながら、この水準測量に基づく高さ系は、高い精度を持つのですが、主に3つの大きな問題がございます。

1つは労力がかかるという点で、水準測量では、4人以上の人員が必要です。

また、時間がかかるという点もありまして、国土地理院では、10年以上の時間をかけて全路線を1周、水準測量を行っております。また、地震発生後に標高を迅速に測ることが難しいという点もありまして、これが迅速な復旧・復興に支障をきたす場合もございます。

3つ目は費用がかかるという点で、4人以上の人員を使って10年以上の時間をかけて水準測量を行いますので、費用も膨大となってきます。

そこで国土地理院では、日本の標高体系を水準測量に代わる新たな手法によって、効率的かつ迅速に維持管理できないかと考えており、本研究を進めてまいりました。

そこで新しい標高体系の構想として、電子基準点を基準にしたGNSSによる標高決定を検討しています。人工衛星を活用して、効率的に維持管理したいと考えています。GNSSというのは、アメリカのGPSや日本のみちびき衛星といった測位のための人工衛星システムでして、電子基準点というのは、国土地理院が全国に展開しておりますGNSSの連続観測局です。

この手法の利点は4つありまして、1つは、全国に既に観測インフラが整備されているという点です。国土地理院は、全国に1,300点の観測網を現在展開しております。

2つ目の利点としましては、常時観測を行っているという点でして、地殻変動に対して迅速に対応することが可能という点です。

また、系統誤差が少ないという利点もありまして、水準測量は、計測の距離が長くなるほど累積誤差によって誤差が大きくなるという特徴がありますが、電子基準点は、基本的に距離に依存した誤差はございません。また、利便性も高いという点もありまして、電子基準点のデータはインターネットで誰でも利用可能です。このように、GNSSと電子基準点を活用することによって、現在の標高体系の弱点を克服できるのではないかと考えました。

しかしながら、新しい標高体系の決定手法には、1つ解決すべき課題がございます。それは、高精度な重力ジオイド・モデルを開発する必要があるという点です。というのも、人工衛星で測る高さは楕円体高と呼ばれるもので、これは仮想的な地球である地球楕円体から地表までの高さをあらわすものです。一方、実用的に使われる標高は、基準面が平均海面で、かつ重力の効果が含まれています。GNSSの楕円体高から標高を得るためには、ジオイド高と呼ばれる補正項を差し引く必要がございます。

現在、GEONETによる楕円体高の計測精度が約1 cmとされています。一方、重力ジオイド・モデル、つまりジオイド高を与えるモデルの精度が約8 cmでして、現段階ではGNSSとジオイドを使って標高決定すると、9 cm近くの誤差が生じてしまうという問題がございます。重力ジオイド・モデルとは、重力データを用いて計算したジオイド・モデルです。現在の水準測量に基づく標高体系の精度が全国平均で約2.5 cmですので、GNSSによる標高決定を、現在の標高値と同等の精度で行うためにはジオイド・モデルの高精度化が必須になってきます。

重力ジオイド・モデルを高精度化する方法として、2つあります。1つは、計算に使用している重力データと数値標高モデルを改良・拡充するという方法です。もう1つが、重力ジオイド・モデルの計算手法を改良するという方法です。本研究では、この2つを実施しています。

データの改良に関しましては、最新の重力観測衛星による全球重力データと海面高度衛星による海上重力データを導入しました。また、高分解能な数値標高モデルを計算に活用いたしました。

データの拡充につきましては、2019年度から航空重力測量を実施することによって達成される予定です。

2つ目のモデル計算の改良につきましては、本研究では、衛星や地上の重力データを使

用しますが、重力データはそれぞれ特徴が異なりますので、それぞれの強みを生かしたデータの結合手法を導入いたしました。

また、重力データをジオイド高に変換するための積分処理の手法も改良いたしました。

また、重力の短波長成分、細かい重力場の構造を、数値標高モデルを使った数値計算により推定いたしました。これを残差地形モデルと呼びます。

本研究では、これらを実施いたしました。

本研究の目的・実施内容をまとめますと、本研究では、高精度で効率的な維持管理が可能な標高体系を実現するために、精密重力ジオイド・モデルの構築手法の研究を行いました。また、そのジオイド・モデルを用いて、新しい標高体系の試作と評価を行いました。

実施内容の詳細につきましては、時間の関係で全てお話することはできませんので、添付の参考資料を参照いただければと思います。

重力ジオイド・モデルの構築手法に関する研究の実施内容につきまして、まず1つ目として、重力データを改良し、高分解能な数値標高モデルを導入しました。欧州宇宙機関が打ち上げた重力観測衛星「GOCE」が、非常に高品質な衛星重力データを取得していますので、そのデータを使用しました。また、海上重力場モデルは、海の形を測る人工衛星、つまり海面高度衛星のデータを使って推定されたモデルを用いました。また、数値標高モデルは10mの非常に高分解能なものをを用いました。

2つ目の計算手法の高度化につきましては、各種重力データの結合手法の改良及び数値積分手法の改良を行いました。また、残差地形モデルの導入を行っています。

3つ目として、これらのデータと計算手法を用いて、重力ジオイド・モデルをすぐに構築できるようなソフトウェアを整備いたしました。

そして、本研究で開発した重力ジオイド・モデルを用いて、標高体系の試作と評価を行いました。

本研究の成果について説明します。まず、重力ジオイド・モデルの構築手法につきましては、左の図が現行の重力ジオイド・モデルで、右が本研究で開発しました重力ジオイド・モデルです。

新しく開発しました重力ジオイド・モデルの精度を評価するために、実測ジオイド高との比較を行いました。実測ジオイド高とは、水準測量とGNSSによって測られたジオイド高です。非常に計測精度が高いのですが、観測するのが大変ですので、余りたくさんの点数を設けることができませんが、精度が高いので、これを用いることで重力ジオイド・モデル

ルの精度評価を行うことができます。

一番右の図がジオイド較差と呼ばれる2つのジオイドの差で、この標準偏差をとった値が一般的に重力ジオイド・モデルの精度と言われています。現行のモデルでは標準偏差8.2cmですけれども、本研究の計算手法とデータを用いますと5.86cmとなりますので、現行のモデルと比べて2.4cmの精度向上を達成したと言えます。しかしながら、新しい標高体系を構築するには、もう2～3cm精度を向上させる必要があります。

そこで、現在の重力ジオイド・モデルの誤差の原因につきまして、地上重力データの観測密度と照らし合わせまして調査を行ってみました。北海道を見てみますと、ジオイド較差がとても大きく、こちらは地上重力データが特に少ない地域と一致します。ですので、北海道のジオイドの較差に関しましては、重力データが少なかったことが原因であると考ええます。

また、同じように中部や関東の山岳域でも誤差が大きく、こちらも重力データが少ないので恐らく誤差が大きいのであらうと思われます。

また、内海の沿岸部でも較差が大きく、こちらは海のデータが悪いためと考えています。海のデータは人工衛星の海面高度計で決定した重力データを用いており、海面高度計は陸に近づくほど誤差が大きくなる性質があります。そのため、恐らく重力データの品質が悪いことで誤差が大きくなったと考えられます。

以上のように、重力ジオイド・モデルをさらに高度化するためには、高品質で十分な量の重力データを使用する必要があるということがわかりました。

現在の重力データの課題としましては、北海道や山岳域でデータが少ないという点や、使用している地上重力データが主にGNSSが気軽に使えなかった1990年代以前に取得されたもので観測点の位置の精度が悪いという問題などがあります。高品質な重力データを整備すれば、重力ジオイド・モデルのさらなる高精度化が達成されますが、地上の観測で十分な量の重力データを集めるためには、膨大な時間と費用を要し、非効率的です。そこで国土地理院では、来年度から4年間の期間をかけまして航空重力測量を実施し、新しい重力データを拡充しまして、重力ジオイド・モデルのさらなる高精度化を達成したいと計画しています。

本研究で行ったジオイド計算を、誰でもできるようにGraphical User Interfaceのソフトウェアを整備いたしました。これによって、航空重力データが拡充された後も、重力ジオイド・モデルがまたすぐに計算できる環境が整いました。

新たな標高体系の試作につきまして簡単に御説明しますと、新たに開発した重力ジオイド・モデルを使って標高を試作しまして、現行の標高値との比較をしました。

その差分をとったものがこちらの図です。両者は、標準偏差7cm、最大較差21cmで整合しました。重力ジオイド・モデルの精度が大体6cmぐらいですので、統計的に予想される範囲内で整合すると言えます。つまり、ジオイドを使った標高の構築手法について、本研究で用いた手法が妥当であることが確認できました。

本研究の達成度・活用の見込みについて、まず、重力ジオイド・モデルの高精度化につきましては、従来よりも高精度な重力ジオイド・モデルの算出手法を開発し、また、それを瞬時に計算できるようなGUI操作型のソフトウェアも整備いたしました。これにより、今後、航空重力測量を行い、データが追加された後も、重力ジオイド・モデルの再計算が容易に行える環境が整いました。

続いて、標高体系の試作につきましては、水準測量とは全く別の手法で構築したにも関わらず、現行の標高と新しい標高は、重力ジオイド・モデルの誤差から予想される範囲内で整合し、その構築手法の妥当性が確認できました。今後、本研究の成果は航空重力事業に活用されまして、効率的かつ迅速に維持管理可能な標高体系を利用できる社会が実現される見込みです。

今後の展望につきまして簡単に御説明いたしますと、今後は重力ジオイド・モデルのさらなる高精度化に向けまして航空重力測量を実施してまいります。本年度はその準備を行っておりまして、航空重力計の購入、測定線の計画策定などを行いました。また、来年度から実際に航空重力測量を実施してまいります。4年間の計画です。

そして2023年度になりますと、本研究の手法、データ、ソフトウェア等を使いまして、精度3cmの重力ジオイド・モデルを構築いたします。そして、この重力ジオイド・モデルを使いまして新たな標高体系を構築し、2024年度に新たな標高体系へと移行する予定です。

これにより標高体系の維持管理の効率化が達成され、また、災害時に迅速に標高値を提供できる環境、社会が実現されると考えています。

以上、本研究の説明を終了させていただきます。御清聴ありがとうございました。

○委員長 どうもありがとうございました。

それでは、これも同じく測地分科会で事前に議論されておりますので、主査からよろしく申し上げます。

○委員 資料2-4をご覧ください。2月1日の分科会は発表者がまだ海外滞在中で、宇

宙測地研究室長に説明していただきました。

まず、6番の成果の概要ですけれども、新しい標高体系をつくるために、重力ジオイド・モデルの改善が必要というのが1つ目。それを使って標高体系の試作、評価をしたというのが2番目の課題です。

まず、1番目の精密重力ジオイド・モデルの開発ですけれども、先ほどの説明にありましたように、データの部分と計算の部分と両方で工夫がされていまして、データには重力衛星とか海面高度衛星のデータを結合して、それから高分解能の数値標高モデルを導入して陸上の短波長成分の改善も行ったということです。計算のほうも精度の高い直接積分を実施しまして、それで結果として、従来のジオイド・モデルよりも精度の向上が認められたということです。

それから、それを評価するための試作と評価を行ったというのが2番目です。

7番目の当初目標の達成度ですけれども、従来のジオイド・モデルを改善して、より精度の高いものを求めるのは達成されたということです。ですので、本研究全体の目標も達成されたと判断されます。

次に、8番目の成果公表ですけれども、1つ目の干渉SAR時系列の成果が、比べると若干足りないかなと思うのですけれども、今後の成果に期待します。

成果活用の見込みですけれども、今回開発されたジオイド・モデルと計算手法、評価方法というのは、今後、航空重力測量によってまたデータが追加されて新しく改善が見込めるといことで、この手法はそのまま将来に活用できるだろうと見込まれます。

10番の達成度の分析ですけれども、重力衛星、それから標高モデルなど、今使えるものをきちんと使って、それから計算手法も改善したといことで、今現在できることでは一番いいものができているのではないかと考えます。

残された課題ですけれども、先ほどもありましたように、現在開発された重力ジオイド・モデルというのは、最終的な目標としているような2～3cmの精度はまだまだいってないといことで、今後、航空重力データが得られるようになれば、さらにこの重力ジオイド・モデルの改善が見込まれるといことです。

最後に総合評価として、本研究は十分目標を達成できたと判断しました。

以上です。

○委員長 どうもありがとうございました。

それでは、委員の先生方から、この内容についての御質問とかコメントがございました

らよろしく願いいたします。

○委員 精度の評価で、平均の差と標準偏差を比べて、多分、系統誤差とランダム誤差みたいなものだと思うのだけれども、系統誤差のほうがすごく小さくなっているのは余り成果としては意味がないのでしょうか。

○発表者 平均較差に関しましては、基準面の違いによるもので、現行のJGE0ID2008モデルでは、基準面である全球平均海面の位置、つまり海面上の重力ポテンシャルの値は、20年以上前に決定された値を使用しています。一方、本研究では、3年ほど前に更新された重力ポテンシャル値を使用しています。これらは基準面の差ですので、研究の手法の改良やデータの改良というよりは、基準のとり方の違い、つまり定義の違いによるもので、余り重要視はしていません。ただ、系統差という観点では、長波長な誤差が衛星データを更新することによって改善されています。

○委員 貴重な研究の成果を御報告いただきまして、どうもありがとうございました。教えていただきたいのは、スライド10で北海道と山岳地帯、あと内海の沿岸域の較差が大きいということでおっしゃっていましたが、これは将来的に解決することをお考えでしょうか。どういうふうにされるのか、それを教えてください。

○発表者 沿岸域の較差に関しましては、航空重力データが整備されますと、重力データの品質が格段に向上しますので、改善される見込みです。沿岸域については、衛星高度計で決定された重力データの誤差が10ミリガルという単位でして、それが航空重力データになると1ミリガルになりますので、必ずよくなると思っています。北海道に関しましても、データがもともと少ないところですので、単純にデータが増えるだけでかなりの向上が見られると思います。山岳域に関しては、残差地形モデルという数値標高モデルで計算している部分があるので、その精度との兼ね合いです。

○委員 はっきり較差の大きいところがわかっているので、こういったところを解決するだけでも随分改善されるのではないかと思ったのでお聞きしました。どうもありがとうございます。

○委員 報告ありがとうございます。2点あります。1点目、テクニカルなことをお聞きしたいのですけれども、1次元FFTの誤差評価というのは事前にできていたのでしょうか。やってみてわかったのでしょうか。

○発表者 FFTで積分を行うと位相ずれなどにより誤差が生じるということが文献調査でわかっておりました。ですので、計算に大変時間がかかるのですけれども、直接積分とい

う形で開発を行いました。

○委員 ありがとうございます。

2点目は、私がこの研究のタイトルを見たときにすぐに連想したのが、東大の光格子時計を使ったつくばと東京大学の2地点の高さを、精度は忘れましたが、当然知ってフォローしていると思うのですけれども、全く違う研究。向こうは多分物理だと思いますけれども、あれを聞いて、ここは2024年までしか出ていませんけれども、もしあれを組み込むということになれば、日本全域で光格子時計をやって、誤差をほぼ一般相対論の重力方程式でやると、今のような議論は、誤差は相当小さくなるというのは簡単に予想できるわけですね。

○発表者 はい。

○委員 ニュースを聞いたときに、研究者として、あれをどう思ったのかなということです。

○発表者 我々も光格子時計による標高決定には非常に興味を持っておりまして、現行では、東大の香取先生が3年前に発表された「nature photonics」の論文によると、5 cmの精度で標高決定ができると。

○委員 そんなものなのですか。

○発表者 ただ、4カ月前に「Nature」で、理論的には1 cmを切る精度で標高決定が将来的にはできるであろうという新しい理論論文が出ております。それが何年後に実現されるのかは、我々は把握しておりませんが、10年後、20年後、その技術が誰でも使えるような形になれば導入を検討できればなどは個人的に思っているところです。

○委員 誤差2 cmというのはどのぐらいの小ささなのでしょう。私は、もっと小さいのかなと思ったのですけれども。

○発表者 2 cmとは、現行の標高の精度と同等の大きさです。

○委員 わかりました。ありがとうございます。

○委員長 ありがとうございます。ほかにございませんでしょうか。

○測地部長 測地部ですけれども、ただいまの光格子時計について若干御紹介したいと思います。

香取研究室とは、昨年度末からスカイツリーの下と上で光格子時計と水準GNSS測定の同時計測をする共同研究を行っております。光格子時計による重力ポテンシャルの直接計測は、私どもを含めた世界中の国土地理院相当機関が注目している技術です。ただ、ヨーロ



ッパのほう若干進んでおまして、ドイツの計量研究所に相当するところと向こうの国土地理院も協力しております。また、2地点間での重力ポテンシャル差を直接比較するためには、2台の光格子時計に加えて、それらを結ぶ特殊な光ファイバーが必要になります。時計は、経済のインフラにも使えるということで、現在、その特殊な光ファイバーをヨーロッパ全域に伸ばす計画を着々と進めております。日本においては遅れて、今、政府の集中的な研究投資の先として、光格子時計プラス、NTTさんほかの光ファイバーの実験を今後始めるということになっております。実現しますと、ほんの1cm、光格子時計を上げてても時間の流れが変わることを捕まえられることになっており、非常に強く期待し、我々も関与しているところです。

○委員 少子高齢化の我が国にとりましては、水準測量の課題というものは大きなものでありまして、今後、こちらの研究成果によって、水準測量に匹敵するような精度の高いデータが出てくる、標高がわかるというのは、我が国にとって必要不可欠なものであるということをお認識しております。

スライド3ですけれども、この成果の社会貢献、社会実装というところで、地震後の迅速な被災地における復旧・復興に、例えば東日本大震災では7カ月を要し、熊本地震では4カ月要しということなのですが、現時点での成果でこれがどれほど改善されるのかというところのイメージと、それから費用がかかるといったときに、具体的にどのくらい費用の削減が見込めるものなのかという点について、お答えできる範囲で結構ですのでお答えいただければと思います。

さらには、航空重力測量が、データが追加された後には、ここの点もどの程度改善されていくものなのかについてお知らせいただければと思います。

○発表者 いただいた御質問に関しまして、私は把握が十分できておらず申しわけありません。かなりの時間短縮が達成されると思いますけれども、具体的に数字を持っておりません。

○測地部長 では、高さ基準系を管理しています私どものほうから。

まず、どのくらい時間が短縮されるかですけれども、暫定的な値は、数箇月をほとんど即日に短縮することを目指しております。具体的には、ジオイドは地震の前後でほとんど変わらないので、ジオイドが高精度に整備されると水準網が崩れても、直ちにGNSS測量で所要の精度までの高さは暫定的に与えることができるといった意味では、即日、当面使える高さは与えられると思っております。

ただし、やはり飛び飛びの点間をつなぐための水準測量ですとか、GNSS測量の相対的な精度は数cmである一方で、水準測量は数mmの精度が出せますので、追っかけて水準測量を行う必要があり、トータルの金額は劇的なほどは安くできないかもしれませんが、当面の工事に十分なだけの成果は直ちにらせるということで、復旧・復興に対する時間的なコストに関しては非常にジャンプのある貢献ができると期待しております。

○参事官 今の測地部長の説明をもう少しだけ、さらに補足いたしますが、水準測量で従来法がかかったというのは、動いてないだろうと思われるところから延々と、スライド3の真ん中の東日本大震災後の水準測量と書かれているような数m程度の物差しを100m以内の間隔で立てて、物差しの間の高さを調べてというのを刻んでいかないといけないので、延々と距離を稼がないといけない、地上測量を何百kmとやらないといけないというので時間がかかると言っていたものが、先ほど彼が申しましたように、ジオイド面がほとんど変わらないので、うんと離れたところにある電子基準点と自分が気になっている場所の最寄りの電子基準点を調べれば、これの楕円体高はすぐに出てまいりますので、そういう意味で数箇月がほぼゼロにという言い方をしたということでございます。

一方、水準測量の課題として発表者が説明しましたように、水準測量の場合は距離に応じて誤差が累積していくので、遠方まで行くと誤差がでかくなるという話がありますが、それは言いかえると、十分短い距離ですと、2cmとか3cmよりも、もっと誤差を小さくできるような短い距離があるということです。そういう短い距離で済むような場所ですと、今後もジオイド精度よりもよいような直接水準ができる場面はあり得ますので、使い分けてまいるということを考えていくことになるかと承知をしております。

○委員 今回の研究でできた新しい重力ジオイド・モデルの位置づけですけれども、例えばJGE0ID2008よりいいのはわかっています。ただ、まだ名前もついてないし、数年後に航空重力データが入って、さらに新しいモデルができるまで、これは単に中間的な位置づけなのか。それとも、とりあえず今回はこれで1つのステータスが持てるものか。どういう位置づけでしょうか。

○発表者 科学的な成果としては、よいものだと思っていますので、今月中には論文を投稿したいと思います。ただ、国土地理院の正式なプロダクトとして、提供する予定はございません。航空重力測量を2019年度実施して、その次の年度に航空重力データを導入したβ版のジオイド・モデルを開発する予定ですので、その段階で提供する予定です。

○委員長 よろしいでしょうか。私から1つ。先ほど参事官と測地部長が言われたことに

関連するのですけれども、2024年に航空重力測量による精密重力ジオイドデータがとれたとすると、そこから先、いわゆる水準測量のやり方が、さっきおっしゃったように、水準点近傍では従来水準測量で、それ以外については、これを使っていくというふうに水準測量そのものを変えていく考えでおられるという認識でよろしいでしょうか。

○参事官　そういう認識で結構だと思っております。実際に航空重力計を買うとか、航空重力測量するというときは、私ども国土地理院の予算の規模で言うと、それなりの支出を伴う話でございましたので、予算を獲得するに当たって、財務省にもそういう趣旨でやり方が変わって、トータルコストは将来どこかで必ず分岐点を超えて下がりますという説明までしております。

○委員長　ありがとうございます。ほかにございますか。よろしいですか。

では、時間も来ていますので、どうもありがとうございました。