

(1) 平成24年度終了特別研究課題 終了時評価

② GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究

○委員長 ②のGPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究に移らせていただきます。これも説明をいただいて評価結果をいただいてから皆さんの意見を伺うことにしたいと思います。説明をお願いします。

○説明者 GPSによる地殻変動監視の信頼性向上のための大気擾乱の影響評価に関する研究について、御説明いたします。資料2-3をごらんください。

まずスライド2ですけれども、本研究の背景についてです。国土地理院では、GEONETにより地殻変動を監視し、その結果を関係機関に提供しております。ですが、GEONETの定常解析では、スライド2の左の変動ベクトル図に示したように、大きな変動が見られる場合があります。このような変動が得られた時点では地殻変動かどうかというのがわかりませんけれども、右の図に示したように、次の日になると、前日の変動が見られなかったということから、前日は誤差であったということがわかります。このように小スケールで大きな測位誤差が疑われる場合、現状ではデータの蓄積を待ってみかけ変動か地殻変動かを判断する必要があるため、速やかに関係機関に地殻変動情報を提供できないという問題が生じます。

このような誤差の原因としては、先行研究によって山岳波のような小スケールの大気擾乱による測位誤差が主因と考えられる場合が多いので、GEONETの定常解析で除去されない小スケールの大気擾乱に伴う測位誤差に対応する必要があるというのが本研究の動機となっております。

スライド3に移りますけれども、このような小スケールの大気擾乱に伴う測位誤差——これから「みかけの変動」と呼ばせていただきます——、天気予報などに用いられる数値気象モデルを用いることによって定性的に誤差を再現できることがわかっております。左の図は先ほど示したGEONETの解析結果による変動で、右が数値気象モデルを用いて推定したみかけの変動を示しております。大きさは異なりますけれども、山を挟んで逆を向いているといったような変動などが定性的に再現されていることがわかるかと思います。

しかし、この数値気象モデルを用いた方法では大気擾乱による測位誤差が必ずしも再現できない、あるいは誤った推定をするといった問題があることもわかっております。このような問題があることを踏まえ、本研究では高分解能数値気象モデルを用いて、大気擾乱による

みかけの変動である可能性の高い低いを判断する技術の構築を目指しました。

本研究の目的ですけれども、GEONETによる地殻変動監視において大気擾乱が測位に与える影響を評価することにより、早期のかつ信頼性の高い地殻変動の把握に寄与することを目的として大気擾乱の影響を評価するシステムを構築することを目標としております。スライド5に、このシステムのイメージを示しましたので、ごらんください。

通常、GEONETの解析によって、左のような変動ベクトル図が得られ、これによって地殻変動を把握しますけれども、この結果には誤差によるみかけの変動の可能性もあります。この結果に対応して高分解能数値気象モデルを用いてみかけ変動を推定し、みかけの変動かどうかを評価したいわけですが、背景で述べましたとおり、推定したみかけ変動は実際の測位誤差を再現できる場合と、できない場合がありますので、このみかけ変動の推定値自体に確からしさを示す品質情報を与えます。

右の図では、この品質情報を信頼度として○△×と表わしています。例えば右の図の点線で囲んだ変動では大きさが有意に大きく、信頼度も高いので、この推定値は確からしいと考えることができます。この結果とGEONETによる変動を比較して、北側の2点は大気擾乱による誤差で、南側の1点は誤差のために地殻変動が見えないのかもしれないと判断することが可能となります。

このような推定結果がGEONETの解析による変動と同時に得られれば、データの蓄積を待たずに大気擾乱の影響を考慮して地殻変動を監視することができると考えました。このようなシステムを構築することが本研究の目標となっております。そのために、上のオレンジの枠に示しましたように、まず高分解能数値気象モデルの生成とみかけ変動推定手法を構築し、その品質情報を過去の事例から整備します。また、システムの構築に当たっては、GEONETの迅速解析や緊急解析に対応して推定結果を得るために、2時間以内で処理可能なシステムを構築することを目標としています。

スライド6に移ります。品質情報集の整備について、もう少し詳しく御説明いたします。これまで述べましたとおり、数値気象モデルには不確実性がありますけれども、数値気象モデルから推定されたみかけ変動自体に誤差を見積もることもできません。そのため、みかけ変動の推定値に対する信頼性情報を整備しようと考えたわけです。

特定の条件では、みかけ変動推定値の再現性が高い場合があったり、低い場合があったりということが想定されますので、過去の事例において、みかけ変動推定値の適合性、つまり観測される変動との一致の程度を全国網羅的に調査します。この調査のために必要となる評

価手法——適合性評価手法と呼びます——を構築し、適合性また地域や気象条件ごとに調査をします。その結果を電子基準点ごとに信頼度として取りまとめようという内容となっております。

次のスライドに移ります。まず高分解能数値気象モデルの生成とみかけ変動の推定結果の手法の構築についてです。気象庁から国土地理院に常時提供されています気象庁メソモデルを入力データとして、気象庁メソモデルでは対象とされない小スケールの大気擾乱を再現するために高分解能数値気象モデルを生成いたします。既存のソフトウェアを活用して、その結果を用いてGEONETの定常解析では除去されない小スケールの大気擾乱によるみかけの変動を推定する手法を構築いたしました。

次に適合性評価手法の構築についてです。表で示したとおり、大きさが地殻変動を監視する上で有意であるかどうかを観測された変動及びみかけ変動推定値のそれぞれについて評価し、有意な大きさの変動に対象を絞ります。その絞ったものについて空間パターンの一致度を評価します。その結果、観測値、推定値ともに有意な大きさであり、空間パターンも一致するものをみかけ変動、観測値、推定値ともに有意な大きさであるけれども、空間パターンが一致しないものをみかけ変動の疑い、有意な大きさのみかけ変動が推定されないものを不明と評価いたします。なお、大きさの閾値はGEONETのF3解析で約5mm、Q3解析で約1cmとしました。

スライド9に移ります。この適合性評価手法を用いて適合性調査を行いますけれども、調査に当たっては対象地域の選定と気象条件分けを行っております。対象地域については、小スケールの大気擾乱は地形起伏によって特定の地域や観測点に影響を与えると想定されるので、大気擾乱の影響を受けやすい地域を影響域として特定し、その地域を対象とします。これについては次のスライドで御説明いたします。

気象条件分けについては、最終的なシステムでの利用を考慮し、比較的簡単に分類できるように天気図を用いて、左下の図表で示したような8種類に分類いたしました。これらの地域条件ごとにGEONETにおいて有意な地殻変動が認められない時期のデータについて調査しました。この調査結果は下の右の表のイメージに示しましたとおり、電子基準点ごとに適合性評価結果のみかけ変動とみかけ変動の疑いの割合が75%以上を○、40から75%は△、40%未満は×として取りまとめました。

先ほど述べました影響域の設定について御説明いたします。大気擾乱の影響域を設定するため、GEONETの定常解析から得られる変動のばらつきとみかけ変動推定値のばらつき

を調べました。また、GEONE T定常解析による変動ベクトル図の特徴を調査いたしました。左の図はGEONE TのF3解析結果の変動のRMS分布を示しております。黄色にプロットした点がRMSの大きい点を示していて、この傾向はみかけ変動推定値とほぼ同じであることから、黄色でプロットした点が大気擾乱の影響を受けやすい点であることがわかりましたので、その観測点を評価対象点としております。また、このような点は山岳域に集中していることが、この図からも見てとれるかと思えます。

また、GEONE Tによる変動ベクトル図、右の図ですけれども、例えば日高山脈の東側の観測点でまとまって変動が見られるのに対して、ほかの地域では見られないというように、大気擾乱によるみかけの変動が生じる地域にまとまりがあることがわかりました。以上の特徴によって全国30地区を影響域として設定しております。

これまでに述べました対象地区と気象条件ごとに調査した結果の一例として日高周辺地区の結果を示しております。○△×は先ほど述べたように適合性の高さの割合を示しておりますけれども、横棒は有意な変動が生じなかったことを示しております。この結果から、例えば観測点0532では気象条件の②④⑤で適合性が高いというように、電子基準ごとに特定の気象条件において適合性の高い低いが特徴づけられるということがわかりました。したがって、この結果を信頼度として活用することにし、○△×を信頼度高、中、低として取りまとめました。以上の調査を全国30地区に行い、品質情報集として整備しました。

以上で構築された手法を用いて有効な大気擾乱の影響評価が可能か、また要求される処理時間で処理可能かということを検証いたしました。その例がスライド12になります。

実際の地殻変動を想定して地震発生時に大気擾乱の影響が疑われた事例として、2011年11月24日の浦河沖の地震を例に挙げております。このときの天気図から該当する気象条件を選択し、その条件における信頼度を付与したみかけ変動推定結果として、下の真ん中の図のような結果が出力されます。この結果から、みかけ変動に有意な大きさであった4点のうち、3点がみかけ変動、あるいはその疑いがあると評価できます。それと、地震直後に得られたGEONE Tの変動、左の図ですけれども、その点線で囲んだ変動を見ると、北側の2点はみかけ変動の疑いがあり、南側の1点は、もしかしたら地殻変動が見えなくなっているのかもしれないと判断することができます。

これを右上の図で示しましたデータの蓄積によって得られたGEONE Tの後日の解析結果と比較すると、北側の2点は変動が見られないのに対して、南側の1点はわずかに地震による地殻変動があるということから、評価は妥当であることが確認されました。また処理に

かかる時間について、1.2時間で処理ができましたので、要件を満たし、有効な手法が構築されたと考えております。

スライド13に移ります。以上で構築した手法を組み込んでシステムを構築いたしました。図のピンクで示した枠内のみかけ変動推定と信頼度の品質情報集の整備は終了しております。処理時間も先ほど申しましたとおり2時間以内で処理可能となっております。これにユーザーがごく簡単な解析設定と、結果を見るときに必要な条件設定が簡単にできるようなもの、また結果を表示する機能を追加して、3月末までに完成する予定でおります。

以上でシステムの説明は終わりですが、実際に地殻変動で問題になった例が研究期間にありましたので、それに適用した結果を御紹介いたします。

十勝岳において火山活動が2012年の6月から7月にかけて認められましたけれども、そのときに上富良野という電子基準点で南向きの変動を観測されました。そのときの変動ベクトル図が左の図になります。0787で南東向きの大きなベクトルがあるのがわかるかと思います。これに対応して、みかけ変動推定結果を計算した結果、真ん中の図のようになります。

ここで、0787以外は有意な大きさが推定されておられませんけれども、信頼度に関しては高いという結果になっております。つまり、0787以外の、大きさが有意でなく信頼度の高い点では、大気擾乱の影響はないだろうと評価されます。一方、0787では、信頼度はやや低くなりますけれども、大きな変動が推定され、信頼度もやや高いということで、この点では大気擾乱を疑ったほうがいいだろうと評価されます。これについても後日の解析結果と比較した結果、0787では有意な変動がなかったということで正しい評価ができたと考えております。以上によって本研究の目標は達成されたものと考えております。

スライド15の成果の活用についてです。本研究で開発したプロトタイプシステムについては、国土地理院の測地観測センターにおいて、地震や火山活動時あるいは有意な変動が観測されたときに、大気擾乱の影響の有無を判断する際の参考資料として、来年度より試験的に活用される予定でおります。また、波及効果としては、今回、説明は省かせていただきましたけれども、小スケールの大気擾乱に伴う影響が観測値に方位依存性のある残差として生じることが明らかになったことから、異方性を取り入れたマッピング関数が小スケールの大気擾乱に伴う測位誤差の軽減に効果がある可能性があるということがわかりましたので、一般のGNSS測量への効果も含め検討を行う予定でおります。

最後に達成度の分析についてです。まず有効性の観点からは、本システムを地殻変動に利用するためには2時間以内で大気擾乱の影響の有無を判断することが要件となりますが、こ

の要件を満たすことを確認しておりますので、有効なシステムが完成したものと考えております。効率性の観点については、数値気象モデルの生成、みかけ変動の推定手法の構築に当たって既存ソフトウェアを活用したことにより、効率的に開発することができたと考えております。また、適合性の網羅的な調査においては、外注で行ったことによって効率的に進めることができました。また、システムの追加機能については、ユーザーである測地観測センサーと協議して実施したことによって、効率的に行うことができたと考えております。

以上で私からの説明は終わります。

○委員長 どうもありがとうございました。

引き続き分科会の評価結果の説明をお願いします。

○委員 本研究は、GEONETの解析データからみかけの地殻変動が得られたときに、それが大気擾乱による影響なのかどうか、その可能性が高いかどうかというのを2時間以内に判断できるシステムをつくり上げているということで、当初の目的であります大気擾乱の影響評価という目標は達成できていると判断できます。

ただ、この問題は非常に重要な問題で、目標として今回は影響評価ということだったんですけれども、影響評価にとどまらず、それをどうしたら補正できるか、真の地殻変動がどういうものであるかということに突っ込める、今後そういうことを行う予定であるとおっしゃっていますけれども、ぜひそれをやっていただきたい。そういう期待を込めて、あえて、かために評価したということで、一部不満足という評価にしましたけれども、これは本当によく頑張っておられるし、これから頑張っていただきたいという期待を込めての評価です。

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、委員の御意見、御質問を伺いたいと思います。

○委員 これは不確定要素が多いといいますか、気象というのは、厳密に把握できるというよりは、かなり誤差なんかもあり得るものだと思うんですね。この成果を活用するためには、ある種の習熟といいますか、実際に運用してみて、勘みたいなものをつかまないと妥当な結果が得られないのではないかという気がするんです。その辺はどうなのでしょう。例えば短期でそのまま使えますといかないと思うんです。実用にするためには、ノウハウみたいなものがたくさん必要だというよりは、機械的にチェックできるようにすることが望ましいと思うんです。その辺の状況といいますか、その辺を教えてくださいませんか。

○説明者 習熟が必要なのではないかというお話ですけれども、システムを構築するに当た

って、そういったものが必要ないようにシステムをつくり上げようというのが第1にあります。経験によって、みかけ変動推定値が正しそうだ、正しくなさそうだというのを判断するのではなくて、それは信頼度として用意します。それによって、必ずしも習熟してなくても使えるシステムにしたいということで、この研究を行いました。

○委員 そうするためには、マニュアルみたいなものをかなりちゃんと整備しなければいけないと思うんです。その辺は検討されていますか。

○説明者 実務に生かすためには、習熟は必要ないシステムにしたいということを申し上げましたけれども、マニュアルを整備しないとわからない部分もあるかと思うので、このシステムが十分活用されるようにマニュアルは整備したいと考えております。

○委員長 今のことと、かために評価したということも含めて質問です。

G P Sのある地点が異常な値を示しているようだと、それを省いたほうが正しいのではないかみたいなことでしたよね。評価のほうは、そこで出たベクトルとG E O N E Tのベクトルで差し引きすれば真のものが計算できるのではないかと、将来、そういうことで期待しているんだろうと思うんです。

怪しいというか、変な動きをしそうだというG P Sの部分が全国では何点ぐらいあるんですか。30幾つかに分けましたけれども、平野の部分は余り影響を受けませんということでしたよね。山岳部のG P Sが異常だから目をつけておいたほうがいいですよみたいな感じのところが、日高のところだと5、6点ぐらいありますよね、みたいなことだと思うんです。全国だと、どのくらい。あるいは気象によってもばらばらなんですか。

○説明者 全国でどれだけあるかというのは、スライド32をごらんください。イメージとしては、このくらいという感じです。数自体は、どのくらいであったか忘れてしまいました。

○委員長 このうちの黄色いやつ、黄色い地点が。

○説明者 スライド32の黄色の点はその対象点にあたります。

○委員長 中部地方はかなりの部分が影響を受けちゃうと。

○説明者 そうです。

○委員長 生のG E O N E Tの変動だけだと心配だという感じになるんですね。

○説明者 大気擾乱の影響を受けやすいということで、大気擾乱によるみかけ変動が生じる頻度が高い点になるかと思います。

○委員長 もう一つ、これがかなりあれだとすれば、スライド7の気象庁のメソモデルですよ、分解能5 km、180分。高分解数値気象モデルを生成する、これは地理院がつくったんで

しょうか。

○説明者 はい、そうです。

○委員長 うまく合うということは、この程度の部分を気象庁も受け入れる程度の信頼性があるような形でつくれたという、そんな意味ですか。

○説明者 気象庁については全国を対象に30時間先まで予測していますが、本研究の高分解能数値気象モデルでは予測をしておりません。将来の気象状態を調べているのではなくて、現時点で得られているデータをもとに現在の気象状態を詳しく調べているというものです。気象庁では全国を対象にしているので、今は5 kmですけれども、それより細かくするというのは計算機上、なかなか難しいということで5 kmになっております。

そうすると、地形がかなりなめらかになってしまいます。スライド21をごらんください。気象庁メソモデルですと、かなりモデルの中に組み入れられている地形モデルがなめらかになるので、地形によって生じる擾乱がなかなか再現しづらいということになります。今回は地形モデルを空間分解能にあわせて細分化していますので、それによって擾乱が起きやすいということになります。

○委員長 私が訊きたいのは、地理院でかなり精度の高い気象モデルみたいなのができましたよね、これは気象庁でも受け入れられるようなものなのかどうなのかということを訊きたかったということです。この辺を正確にしないと、将来の差分でやったときの真の地殻変動が本当に正しいかどうか、検討はできないわけではないんだろうと思うんだけど、結果としては、ここの部分が真の状態をあらわしていないと、真の地殻変動も出てきませんよね。そういう意味で、ここのところの高分解能数値気象モデル生成という部分が、気象屋さんとか気象庁あたりが「まあまあ大丈夫じゃないですか」とか「結構ですね」みたいなレベルまで行っているのかどうなのかみたいな。

○説明者 高分解能気象モデルを生成するに当たってモデルのパラメータのチューニングをする必要がありますけれども、それについては気象の専門家にある程度やっていただいているので、こういう計算をしたら、このくらいの結果が出るというのはまあまあだというふう

に受けられるものだと考えております。

○委員長 地理院がそう思っても、気象屋さんが「これはほとんど合いませんね」と言うと、後がガラガラと崩れちゃうというか、信頼性があれだから、ここでチェックしておいて、本当に向こうが納得するかどうか、適当に納得するとか、全然だめだとか、そのレベルでいいんだろうと思うんですけれども、やっておかないと、幾ら計算しても信頼性を失っちゃい

ますから、そのあたり少し注意してもらってということで、そういうのがうまくいけば、この点だけが不安じゃなくて、計算しちゃえば計算できますよね、真の値を。そういうことですよね。

○説明者 気象モデルの信頼性が十分高ければ、そもそもそれを信じてしまえばいいというのは、おっしゃられるとおりですけれども、気象モデルは不確定性があるものですので、その点も踏まえて今回、測地に合うのか合わないのかという観点で、数値気象モデルが現実をあらわす、あらわさないを調べたというふうに考えています。

○委員長 だから、先ほど評価のほうで言いましたけれども、ある一点が何か異常な値を示している、それは気象のほうの問題で、それが出ちゃっているんで、ここのGPSの値はどうも信頼できないから除きましょうみたいなことは、今回、指摘できるような状況になったということですよ。

評価委員会の期待はそうではなくて、さらにそれを進めて、真の地殻変動の値を出せないかということをするほうまでいきませんかという話で、かために評価にしましたと。今みたいに、気象データはそもそもラフなので、できませんと言っちゃったら、将来、できないことになっちゃいますよという。そういうことです。

○説明者 その通りだと思います。

○測地観測センター長 このプログラムといいますか、提案書に戻って見ていただくとわかるんですけども、まず気象庁のメソモデルがあって、それを詳細化するために使っているモデル、モデル自体は、既に学問的にといいますか、実務的に評価を受けられている、モデル自体については既存のモデルを使っているんですね。

研究官がやったのは、それを測位のシミュレーションに使うようにカスタマイズすること。それをやっているんで、モデル自体については、気象の専門家がもともとつくったモデルを測量に使えるようにカスタマイズしたと。要するに、大気中でGPSの信号が遅れるのはどういう部分になるかというところを評価できるような部分をカスタマイズしたということなので、気象そのものの部分についてのモデルというのは、既存の、ある程度評価を受けたものを使っている。そういうところがベースになっているという、そういう御理解をいただいてよろしいと思うんです。

○委員長 今のようなことだと思うんですが、いずれにしても、ここのモデルが一般的な気象屋さんが、現実に出てきた結果、高分解能の気象モデルが納得いくようなものがちゃんとつくられたかどうかの確認といいますか、地理院の中だけで「いいじゃない、いいじゃない」

と言っているだけでもだめだと思うんです、信頼性から言うと。そういうのは別の部署でもいいですし、気象庁の人でもいいですけれども、そういうあたりとやって、そこその精度でつくられているんじゃないですかという確認は必要ですよ。それをしていかないと、期待されている計算はできないですよ。そういうことだと思うんです。

ほかにはないでしょうか。

○委員 例えば32ページ、全国いろいろな地域で黄色と青色の点がいっぱいあるんですけれども、素人的に考えると、直感的に大気擾乱は地形にすごく影響されるような気がするんですが、きょうの御説明の中で地形と起きる状態との関係は全然御説明がなかったんです。例えば長野の山岳地帯でも全く起きていないところもあれば、平野部でも起きているようなところもあって、細かい地形がすごく影響しているんじゃないかなという気がするんですが、そのあたりはいかがでしょうか。

○説明者 まさにおっしゃられるとおりで、地形によってかなり大きく異なります。スライド22をごらんください。まさに地形によって擾乱が起きているという例です。右のカラーのコンターでかかれていますものですが、山のある西側では全く波が見えないのに対して、風が山を越えたときに擾乱が見えるという感じで、このように地形によってかなり擾乱が起きるというものを表わしています。

○委員 何を言いたかったかという、地形というパラメータも擾乱が起きる場所を特定するのに非常に重要なもので、今後、シミュレーションしていくときに、起きやすい地形の場所を選定して、そこで細かく解析をするということも重要なんじゃないか。ほかのところでやると別の要素が入ってきて特定しづらいんだけど、地形的にはこういうところが確実にすよみたいな結果は非常に重要なポイントになるのではないかなと思うので、もし今後続けてやられるときに、そういうことを考慮されるといいかな。要するに、地理院としては、10mメッシュとか、非常に詳細な地形情報をお持ちですから、そういうのはすぐに使えるんじゃないかと思うので、そういうのを使われるとどうかなと思いました。

○説明者 ご提案ありがとうございます。

逆のセンスの活用は今やっているところでして、どこに基準点をつくるのがいいかという条件として、このシステムでシミュレーションを行って、なるべくみかけ変動が生じにくいところを選ぶということに活用しているところです。

○委員長 ほかにありませんか。

ちなみに、温帯高気圧という言葉は気象用語としてありますか。

○説明者 温帯低気圧というのは、はい。

○委員長 温帯高気圧はある……。地理の分野では基本的には使わない。

○説明者 ○委員長 移動性高気圧とか小笠原高気圧はあります。熱帯高気圧というのは使いますか。

○説明者 熱帯高気圧は使わないです。

○委員長 寒帯高気圧……。

○説明者 その辺、確認してみます。

○委員長 そういうことを含めて、気象の専門家がかかわったというんだけど、心配だという。これは僕もあれですけども、今後の課題としては、その辺も検討していただいたほうがいいだろうと、そんな感じがしますということです。

ほかにありませんか。何かプラスするコメントありますか。

○委員 これは、こちら也非常に期待していますので、ますます頑張ってくださいと思います。

○委員長 ということで、②の課題はこのぐらいにさせていただきます。