

(1) 平成30年度終了特別研究課題 終了時評価【審議】

①干渉SAR時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究

○委員長 それでは早速ですが、議事に移ります。

議事(1)干渉SAR時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究について、まず国土地理院から御説明をよろしく申し上げます。

○発表者 お手元にある資料番号1-3を前面に映しながら、成果の概要について御説明させていただきます。

本研究は「干渉SAR時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究」と題しまして、平成26年度から30年度までの5年間、研究経費を約6900万円として実施しております。

初めに、本課題を提案した背景説明を簡単にさせていただきます。

本研究課題の対象技術であります干渉SARであります。衛星などから地上に電波を照射して得られた反射画像について、異なる2時期の画像の差、これは技術的には電波の位相の差をとりますけれども、その差をとることによって、その間に生じた地表の変動を計測する測地技術であります。

右の図に示しますように、この技術を用いますと、地盤の変動を画像として面的に把握、計測できるというのが最大のメリット、長所となっております。国土地理院では、この技術を用いまして地盤の変動の監視等を行っておりまして、その結果は各専門機関での活動評価等に活用されております。

しかしながら、干渉SARも万能な技術ではございません。従来の既存測量技術と比較しますと、面的な観測ができるという長所がある一方で、その計測精度は数cmにとどまっているという短所がございます。国土で進行する地盤変動を網羅的に把握するためには、面的な観測を可能な限り維持しつつも、より高い計測精度で地盤を計測する新しい測地技術が必要とされてきました。

このような背景の中、干渉SAR時系列解析と呼ばれる応用技術が急速に近年発展しております。本手法では、従来の干渉SARと異なり、多数枚のSAR画像を使います。これらを統計的に処理することによって、さまざまな計測精度の画素が入りまじっている通常の画像の中から精度のいいものだけを選択的に抽出して、全体の画像の精度を高めようという技術であります。この技術は多数枚の画像を用いることから、変動の時間推移も把握できると

いう副次的なメリットが発生することも特徴であります。

しかしながら、国土の変動監視に適用するには幾つかの課題も残されております。本研究の提案時に課題として挙げさせていただきましたが、1つは山間部における計測点数の低下、そして大気、電離層の誤差による計測精度の低下です。これらは、どれも国内の監視能力を高める上では克服すべき課題であり、こうした弱点を抑え、国土監視に適した干渉SAR時系列解析の技術に発展させるという必要性がありました。また、少し違った観点ではありますが、一般的に干渉SAR時系列解析は中間処理が非常に多い複雑な処理です。解析や分析に手間がかかり、全国を対象にして監視業務、研究業務をしていく上で、効率的な計算ができる解析環境を構築するというのも国土地理院としては重要な課題でありました。

このような背景から、本研究では年間数mmから数cm程度の微少な規模で進行する地盤変動の時間的推移を面的に検出するということを目指して、以下、2本柱を目標に研究を遂行してまいりました。1つは、植生、大気、電離層の影響を低減するための技術開発を行いました。2つ目に、解析作業、分析作業を効率化することを目標に、専用の解析システムを構築するということを行ってまいりました。以下、簡単ではございますが、開発成果を示していきます。

最初に、技術開発です。このスライドでは、各技術開発の内容と適用効果の概要をまとめております。本研究では、植生の対策のために、干渉SAR画像内から精度のいいものを抽出するための新しい技術を開発しました。位相最適化処理と呼ばれるものです。大気の影響低減には、数値気象モデルを用いた誤差低減技術を実装しました。そして電離層に対しては、電離層の誤差をピンポイントで低減するための新しい技術であります周波数分割法と呼ばれる技術を開発して実装してあります。

各開発技術の詳細につきましては、測地分科会での説明を既に経ていることから、時間が限られている本日はその詳細を参考資料のほうに譲っておりますが、これら開発した技術を用いることによって、山間部での計測点数の大幅な増加、そして大気や電離層の誤差を大幅に低減することを実現しております。その中から本日は、植生の技術開発の成果について、次のスライドで簡単に御報告させていただきます。

ここでは解析事例といたしまして、立山の弥陀ヶ原火山を対象にした結果を示しております。下の空中写真に見られるように、この場所は草地で覆われた山間部になっております。こうした場所に、従来の方法を用いますと、得られる変動速度は上の図のようになり

ます。計測点はまばらで、その数は約2,000点にとどまっております。一方で、こうしたデータに対して新しく開発した技術を適用いたしますと、計測点数が約21万点、約100倍にその数を向上させることができいております。

本技術の重要な点の1つは、こうした地熱地帯で進行する局所的な地盤の膨張を明瞭に捉えたという点にあります。実は従来の手法でも、ここにオレンジ色で示されるようにつすら変動が見えているのですが、その広がり詳細に把握することはできません。新規技術によって把握することができております。本手法は、今後の火山観測、特にこうした局所変動を検出するための新しいツールとして利用されていくことが期待されます。

さて、本研究で開発した時系列解析の技術でございますが、どれくらいの精度で変動が検出できるのか、ここでは新潟平野における水準測量データとの比較で検証を行っております。

左の図はSAR時系列解析から求めた上下変動速度、四角は水準点を示しており、そこで求められた上下変動速度です。同じ色であれば、両者が整合していることを意味します。

そして、それらを縦軸、横軸にプロットしたものが右の図になります。この図からわかりますように、SARで求められた上下変動でございますが、約6 mm/yrの最大較差で水準測量との一致を見ております。すなわち、本研究で開発された時系列解析の技術によって、年間数mmから1 cm程度の速度で進行する変動も検出可能であると示すことができていると思います。

こうして開発した技術を用いまして、研究の途中ではございますが、幾つかの成果も既に公表しております。その1つが大涌谷の噴火に関するものです。この研究では、噴火に先行して、大涌谷の局所的な場所で膨張が進行していたことを発見し、そして、その膨張が噴火の直前に加速し、噴火に至ったという現象を発見するに至りました。いずれにしても、こうした成功には、本研究が目指した、山間部においても、微小な規模で進行する変動の時間推移を面的に検出するという本研究の目的が達成されているということを示しております。これら成果は、既に国際論文としても発表しておりまして、その論文がさらに物理学の専門誌でも紹介されるという成果を得ております。

続きまして、システムの開発についてです。本研究で開発した時系列解析技術は、多くの高度な中間処理とそれを動かす200個以上の計算プログラムで構成されております。基本的な操作はコマンド上での操作になり、それを一連で実行するには非常に手間のかかるものです。こうした作業を効率化するために、本研究ではGraphical User Interface (GUI)

操作によって、統合的にこうした処理を制御、操作することを実現しております。

これは、その開発したソフトウェアが動作している様子をムービーで御紹介したのですが、このようなソフトウェア上でSARデータや数値気象モデル等を設定して、マウス操作でユーザーが各処理のオン、オフを切り替えながら実行します。そうすると、自動的に計算が始まって、計算後、その結果を簡便に確認することもできます。このようにしてGUI操作によって各処理を統合的に制御し、各解析作業の効率性を向上するということを実現しております。

また、こうした解析作業を通じて得られた結果の分析作業というのもまた重要です。ここでは、さらに分析作業を効率化するために専用の画像表示、操作化システムの機能を開発いたしました。これにより、次のような操作が可能になっております。

これらの動作を再びムービーで示しますが、このようにマウスで画像の拡大、縮小が自由にできます。また、例えば、変動域を左クリックすると、座標位置、緯度、経度、そして変動速度等の値をすぐ抽出・表示することができます。さらに、今選択した場所に対して、変動がどのような時間発展をしていったのかがすぐわかるように、このような設定画面を通してすぐにグラフ化することができます。こうした操作により、例えば、ここでは年間4cm地盤が変動して膨張していたということが簡便にわかります。また、先ほどはある点での変動の時間発展を確認するものですが、これが空間的にどのように発展していったのか、それもすぐ視認できるように、こうした複数表示機能を開発しました。さらに、それらの場所をすぐ同定できるように、それぞれが連動して動くように機能も実装しております。

以上のように、GUI操作によるシステムの構築によって、分析作業も大幅に効率化することを実現しております。

このように本研究で得られた成果でございますが、今後、地盤変動測量事業など、ALOS-2衛星を用いた地盤変動の監視、研究での利活用が期待されます。

また、本技術はALOS-2衛星以外のSAR衛星にも適用可能です。特に2020年度には次期国産LバンドSAR衛星、先進レーダ衛星（ALOS-4）が打ち上げられます。この先進レーダ衛星（ALOS-4）を用いた地盤変動監視での利用も強く期待されるところであります。

以上、まとめに入りますが、技術開発を通じて国土監視に適した干渉SAR時系列解析技術を開発いたしました。また、専用の解析システムを開発することによって解析・分析作業の効率性の向上を実現しております。

簡単ではございますが、以上で説明を終了させていただきます。

○委員長 どうもありがとうございました。

それでは、測地分科会で事前に議論されておりますので、主査からよろしく願いいたします。

○委員 測地分科会は2月1日の午後に開かれました。資料は1-4をご覧ください。6番の成果の概要から説明しますけれども、本研究の成果は、そこにまとめましたように大きく2つに分かれまして、1つは、干渉SAR時系列解析のための技術開発、もう1つが解析システムの開発ということです。

測地分科会では、技術開発についてかなり詳しく説明をしていただきました。きょうは時間の関係で専門的な内容は割愛されていましたが、当日は特にこの中の3つ、植生、大気、電離層の影響を何とか克服して解析精度を上げるということを説明していただいて、そこで詳しく議論させていただきました。そこに書きましたように、いずれも非常に高度な内容の処理が行われて計測精度の向上が確認されたということです。

それから、2番目のGUIを用いた解析システムの開発も無事行われまして、解析、分析が非常に効率よくできるようになったということです。

次に、7番の目標の達成度ですけれども、もともとの目標でありました計測点の空間密度や計測の精度を劣化させる原因となる植生、大気、電離層の影響を低減する技術を開発するという目標は達成されたと言えます。

2番目の干渉SAR時系列解析作業の効率化のための解析システムの開発というのも達成されたので、本研究全体の目標も達成されたと判断しました。

次の成果の公表ですけれども、資料1-2にあるように、非常にたくさんの成果が既に挙げられております。

それから、9番の成果活用の見込みですが、地盤変動監視・研究はさまざまな分野での利活用が認められます。例えば地震予知連絡会とか火山噴火予知連絡会への情報の提供であるとか、次のLバンドSAR衛星である先進レーダ衛星（ALOS-4）、それから、ほかのSAR衛星にも十分活用が期待されるということです。

達成度の分析ですけれども、年間数mmから数cmという速度で進行する地盤変動を干渉SAR時系列解析で検出できることが確認されたということで、非常に有効であると考えます。

最後に、11番の残された課題ですけれども、今、研究段階ですが、これが将来的に業務として行われるようになると、しかも、次の衛星が上がるとデータが非常に大量になるの

と、リアルタイムとまではいかなくても、結果の分析までに短い時間が要求されるということ、そういうものを処理していくための計算機環境の整備が地理院として非常に重要になっていくのではないかと考えます。

最後に総合評価として、十分目標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、発表者からの御発表と分科会での御報告につきまして、委員の先生方から御質問とかコメントがございましたら、よろしくお願ひしたいと思います。どなたからでもよろしいです。

○委員 非常にすばらしいたくさん研究をされていまして、ありがとうございます。教えてもらいたいのですけれども、時間の関係で多分は省略されていると思うのですけれども、位相最適化処理の添付資料がありますけれども、簡単でよろしいので、この原理を御説明いただけますか。

○発表者 まず、従来法との違いから御説明したほうがよろしいかと思しますのでスライド20をご覧ください。SARは電波を使っているので、振幅と位相の情報があります。従来法は、振幅の情報を使って位相の安定性を図るということをやっています。位相は直接安定性を測るのが難しいという背景があるためです。位相値はゼロから 2π に折りたたまれた値ですので、直接時間的な安定性を評価するというのは非常に難しいため振幅を使います。強い反射強度を持つものは位相精度が良いというSARの理論的背景を利用して、それを見つけて位相精度の良い画素を抽出するというをやっています。

ただし、そうしたものはほとんどがビル等の人工構造物になるのですが、山間部においては、そういったものが少なくなり、結果的に計測点数が減ってしまうということになります。そこで、この手法では、位相を直接扱って時間的な安定性を評価していこうということをやっています。

つまり、まず1つ目には、位相を直接扱ったということが重要な点です。

スライド21と22が、その位相を直接扱う手法の原理を示すものですが、実は水準測量の網平均計算に似たようなことをやっております。PS点を用いた場合を従来法と考えていただきたいのですが、もし誤差がほとんどない場合にはこのような関係になります。例えば、観測が1回目、2回目、3回目と実施されたとします。InSARの場合には2枚で1つの計測ができますので、例えば画像1枚目と2枚目で計測ができ、2枚目と3枚目で計測ができ

ます。

例えば、最初の1枚目と2枚目で4cm、2枚目と3枚目で6cmと計測結果が出たときには、原理上は当然1枚目と3枚目でInSARをつくれば10cmになるはずですが、誤差がない場合には必ずそれぞれの干渉SARで計測した値が整合的につながります。しかしながら、実際にはこういった強い反射体を持っていない場所というのは誤差が大きく含まれます。誤差が入った状態ですと、それぞれの干渉SARで計測した値の足し算が整合的につながらなくなるということが起こります。今回開発した技術では、こうした誤差による影響を、SARの統計的理論を利用して抑え、最適な位相値を推定していくということを行います。1と2、2と3で得られた計測値の足し算が1と3からのものとイコールになるように最適な位相値を推定して、それぞれの位相をどのペアでも整合的につながるようにするというをやっています。水準測量で行う網平均計算と似たアプローチですが、位相が周期的な値であることから、数学的には最小二乗ではなく最尤法により最適な位相を推定していくということをしております。

○委員 そうすると、これは変化した分は地盤が変化したのか、植生が伸びたのか、本当の値はわからないですね。除外した誤差処理なのか、地盤変動の分なのか、植生の増加分なのか。3本の可能性がある。

○発表者 植生については、振幅画像は確かに木から反射したのもデータとして入ってきますが、干渉SARの場合、揺れ動くようなものというのはそもそも干渉しなくなります。

もう1つ、Lバンドなんかは特にそうですが、電波は地面の中にある程度潜ります。我々の経験上、干渉SARで捉えた位相変化は地面の動きそのものを計測していると考えています。

○委員 ありがとうございます。

○委員 大変興味深い内容であると思います。今の御説明で私にはなかなか理解できない部分もあるのですが、植生について考えると、(実際には)木本類の場合は幹とか、枝とか、かなり強固なものがあります。草本類の場合、今説明された例で出てきたのも、基本的に草本類や低木類などがあるような場所で非常によく出てきたということなのですが、かなり密な森林のところでも、この方法は非常によく捉えられるということなのでしょうか。

○発表者 SARは受信側をコントロールできないという弱点がありますので、なかなか一概にはお答えできないのですが、立山の場合、このあたりは少し植生が深くなります。です

ので、捉えられるところもあります。しかし、もう少し山奥に入った場所だと捉え切れていないということで、やはりマイクロ波にとって、散乱状態、土地の状態がよかったか、よくなかったかによって、かなり左右されてしまいます。ただ、従来の技術でこういうところは捉えられなかったということがやはり重要な点であると考えています。

○委員 特に火山の地盤変動などを捉える場合は、木が生えてないところがとても効果が得られるかなとは思って、まずは（地震による）地殻変動というより、火山の変動を捉える方向でさらにどんどん研究が進むと感じました。

○委員 非常に興味深い御報告をどうもありがとうございました。2点お聞きしたいのですが、植生ということできょうお話しいただいたので季節差があるのかというのが1点目なのです。

2点目として、火山ということで、特にスライド11なんかは御説明いただいたと。そうすると、噴火の前の予兆というのが、地殻がどんどん膨張しているというのを捉えているわけですね。それがさらに翻って、防災といったところとか、人がもう逃げなきゃいけない状態になるような爆発、噴火なんかもあると思うのですけれども、そういった防災とか減災までつなげることができるのか。その2点について教えてください。

○発表者 まず1点目、若干技術的なところだと思いますけれども、植生の季節変化ですが、我々はよくLバンドという、比較的波長の長いものを使うのですけれども、明瞭に季節変化を位相変化として捉えるということは、そんなに多くはありません。季節変化というところで言うと、やはり大気の大擾乱のほうが実は我々にとっては大きな誤差で、そちらのほうに影響が強く出るなというのが解析をしている実感でございます。

2点目の防災につながるところですけれども、箱根の場合では、加速していくこの部分については変動が大きかったので通常の干渉SARでも捉えられたもので、噴火の前に緊急観測を通じて検出された情報は、気象庁や噴火予知連といった専門機関に提供され、それが最終的に火山活動評価の1つの材料になったという経緯がございます。

したがって、こうした地盤変動の情報というのは各専門機関の評価を通じて社会の中でも活用されていると我々は感じております。本研究につきましても、実際、開発した技術をもって捉えられた中期的、長期的な変動の様子を専門機関に提供しております。噴火予知連を通じて変動の結果を火山活動評価に活用していただくというのは我々の業務の1つでもあります。研究開発の途中に福島県吾妻山の変動を捉えることができまして、その結果を資料として提出させていただいた経緯もございます。今後、火山活動の活発化

等の際に、この技術が実際の社会の中でも活用されていくと期待される場所でもあります。

○委員 研究成果としても貴重だと思うのですが、それプラス、さらに社会の中でも防災・減災といったところで研究成果がどんどん役に立つといいですか、うまく生かしていただくと、とてもありがたいと思いますので、ぜひやっていただけたらと思います。

○委員 報告ありがとうございました。2点あります。

1点目は、今、委員からあったのと似ているのですが、システムの安定性ですね。この3点、誤差を軽減するため、植生、大気、電離層、年間を通しての安定性はどのぐらいのものなのか。今聞いている範囲ではほとんどないような感じでしたけれども、実験データがもしあるのであれば、どのような安定性があるのか。

2点目は、「Physics Today」に発表、紹介されたとありますけれども、その経緯というか、反応というか、その事情ですね。お聞きしたいと思いました。よろしくお願いします。

○発表者 まず、1点目のご質問は、システムの動作の安定ということでよろしいでしょうか。定量的な答えを持ち合わせておりませんが、実は開発途中ではありますが、業務のほうで実際試行を既にしてしております。私のような研究者、技術開発者だけではなくて、解析の原理等には余り詳しくない非専門家の方も、そのシステムを使用して結果を出していただいております。使用した際の使い勝手等の情報をいただいて、それを開発にフィードバックさせている最中ではございますけれども、システムを動かし変動結果を出しているという面では、私のようなプロフェッショナルな人間が介在しなくても、既に動作をしているというところで安定して動いているという認識であります。

2点目の「Physics Today」でありますけれども、最初にこちらの右上に示します論文、これは地球科学の専門の論文でありまして、地球科学一般では比較的インパクトファクターが高い雑誌です。「Physics Today」では記者を何人か抱えているようで、そのうちのある方が、そういった雑誌を検索する中で、本論文が目にとまったと思われまして。その方から直接メールでインタビューさせてくれないかということでやりとりして記事にさせていただきます。

○委員 記事の反応等はまだないのですか。

○発表者 記事の反応は、さすがに私ではわかりません。

○委員 これはいつ出たのでしょうか。

○発表者 論文自体は昨年春に出したもので、「Physics Today」はたしか夏ごろだったと思います。

○委員 わかりました。ありがとうございます。

○委員 SARの処理は非常に難しいので、このツールはせっかくできたのですから、オープンソースとか、そういうものに出して、今の操作性はどうなのか、必要なスペックとか、教えていただければ。

○発表者 実は商用のプログラムを一部使っておりまして、第三者に配布するということが現状難しくなっております。将来的にはそういったものも自前で開発していくというのも重要だと思っております。国土地理院の内部でソフトの公開等についての検討を将来的にしていきたいと思っております。

○委員長 よろしいでしょうか。ほかにございませんでしょうか。

○測地部長 1～2点補足させていただきます。

研究センターで開発された技術で現場適用可能になったものは、この種のものでと、私ども測地部のほうで実用に供することになります。この研究は、既に実用レベルに達しており、噴火であれば、噴火警戒レベルですとか避難指示、避難勧告をかけるか、解除するかといった判断。また、誤差が低減されることで、地震において、大きな変動がこれまでであった場合だけアナウンスしていたのですけれども、変動が見られないということも外部へ出せるレベルに達しております。

また、評価の中で残された課題として、先進レーダ衛星（ALOS-4）に適用するために十分な計算機環境の整備が望まれるということありましたが、今回の第2次補正予算で1億円を超える計算機資源の整備の予算を獲得いたしましたので、本研究の成果を先進レーダ衛星（ALOS-4）の環境に合わせる準備を測地部では進めることを決定しております。

以上です。

○委員長 ありがとうございます。ほかによろしいでしょうか。

それでは、どうもありがとうございました。