特別講演

「宇宙から見る大地の変動」
―陸域観測衛星「だいち」による地震・火山噴火の予測研究の進展―

講演者

京都大学防災研究所教授

橋本　学氏

プロフィール

1957年生まれ。1984年京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了、同年建設省国土地理院入省。1997年より京都大学防災研究所地震予知研究センター助教授、2001年より同センター教授。現在に至る。理学博士。地震予知連絡会委員。

専門は、地震テクトニクス。特に地殻変動と地震発生の数値モデルの研究に取り組み、現在は、宇宙測地技術による地殻変動研究を主な課題として取り組んでいる。

主要著書：防災学ハンドブック（朝倉書店）、防災工学，第2巻地震災害論，地殻活動・地震・地震動（山海堂）など

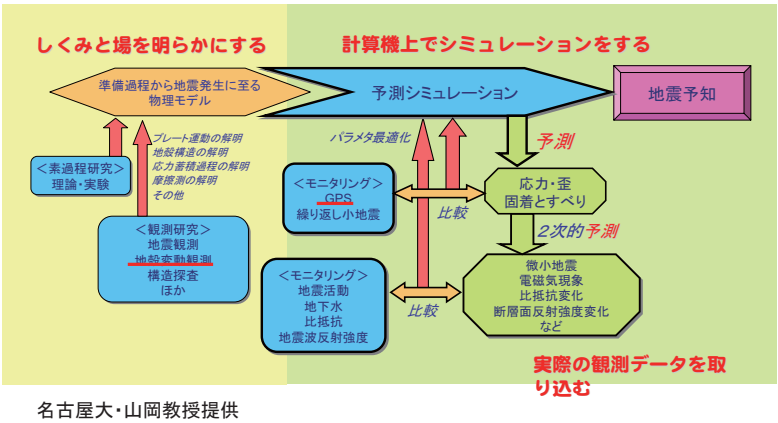
1. 地震予測研究と観測技術の進展

日本列島は地震が多発するところで、地震災害をいかに軽減するかというのは、日本国民1億2,000万人の悲願と言って間違いないと思います。私は、宇宙からものを見ようという研究を進めておりますので、そのご紹介をしたいと思います。

日本では地震予知研究計画が今から40年ほど前から始まり、5カ年計画を繰り返しております。今年で通算第9次ぐらいになります。阪神・淡路大震災の後、それまでの基本的な考えを変えて、現在は図-1のように地震のデータをとって、物理モデルを構築し、シミュレーションを行って、さらにこれをデータにチューニングしていくわけです。それを基に地震に関する予測を行います。実際の観測データを取り込んで、シミュレーションを行い次の発生予測につなげようとすることは、言うなれば天気予報と同じ考え方です。天気予報は現象が非常に早いスピードで動いていきますので、いろいろな経験も積めるし、事例も多く積み重なっているわけですけれども、地震については、阪神・淡路大震災のようなものは多分1000年に1回、それから、今懸念されております南海地震のようなものでも150年か200年に1度ぐらいと頻度が非常に低いということで、このサイクルを回すのはなかなか大変だということがございます。基本的に物理学の考え方、力学の考え方に立って、このようなサイクルを回して次のプロセスを予想していこうというのが、今、我々がやっている研究の基本の精神であります。

観測データの中で地殻がどう動いていくか、地面がどう動いていくかという基本情報を、地殻変動観測を継続して行い蓄積していく必要があります。私が国土地理院に入った頃の1980

「地震予知のための新たな観測研究計画」
基本的な考え方



名古屋大・山岡教授提供

図-1　地震予知のための新たな観測研究計画

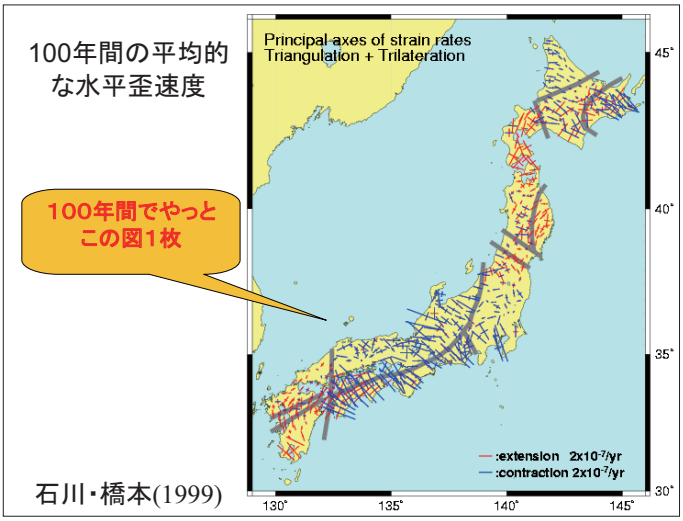


図-2　100 年間の平均的な水平歪速度

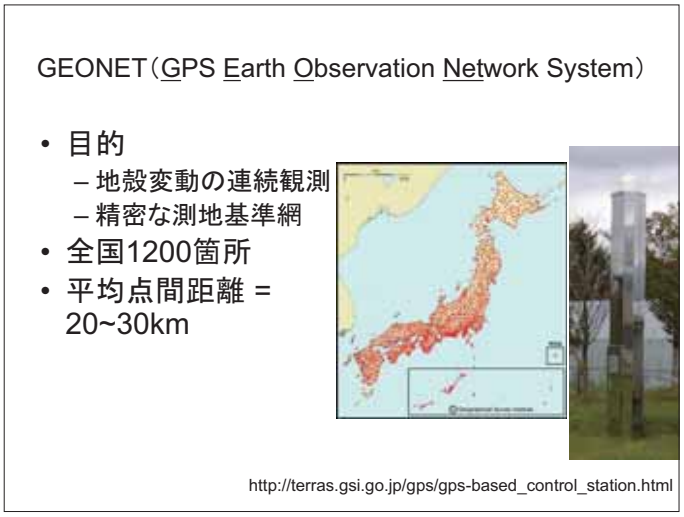


図-3　GEONET

年代は、まだ三角・水準測量の時代で、日本列島全体あるいは関東地方を同時にまたは連続して観測することが出来ませんでした。三角点の周りに森があったりしますと、木のやぐらを建てるとかし、水準測量では数キロにわたってこつこつと繰り返し測量していくわけです。そういう労力が大変でありました。このような状況であったため、新しい技術が何か出てこないかなという期待は高まっていったわけです。

図-2 は私が 20 年ほど前につくった絵でありますけれども、このような苦労を 100 年間積み重ねて、やっとこういった絵が 1 枚書けるというのが、今から 20 年、30 年前の話だったわけです。

それから GPS という画期的な技術が導入されました。初めて GPS が導入されたのは 1987 年であり、その後の阪神・淡路大震災の後に日本列島全域で図-3 のような GPS の観測局が設けられております。隣の観測点までの距離が平均的に 20 ～ 30km の密度で、日本列島全体のネットワークが完成しました。

その結果、図-4 のような観測局の変位の絵が毎日描けるようになっております。現在、国土地理院のホームページをご覧いただきますと、絵のデザインは違いますが、このようなベクトル図や GPS の観測点間の距離の変化量など、皆さん方もご覧いただくことができます。現在日本列島がどのように変動しているかということが手に取るようにわかる状況になっております。日本の GEONET というネットワークは世界に誇る画期的な成果であり、アメリカもここ数年で点間距離 20km 程度のネットワークの整備に着手しております。しかし、いかに高密度の GEONET をもってしても、昨年の能登半島地震のような大規模な地震の場合は GEONET だけでは足りないということが判明しました。なぜ足りない

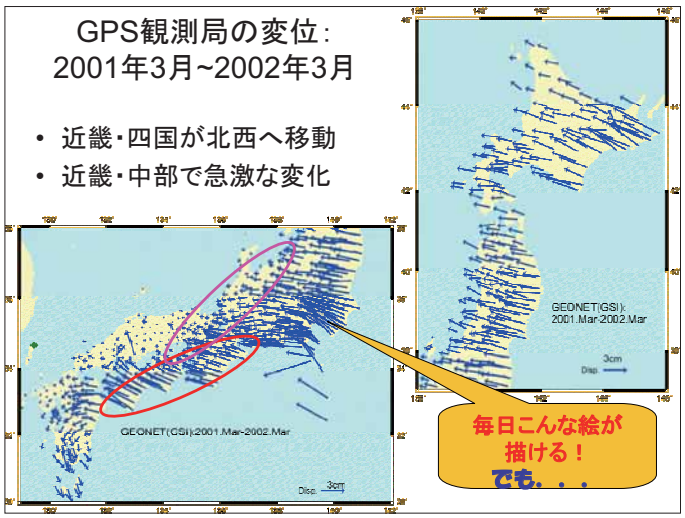


図-4　GPS 観測局の変位

特別講演

the Content of a Lecture

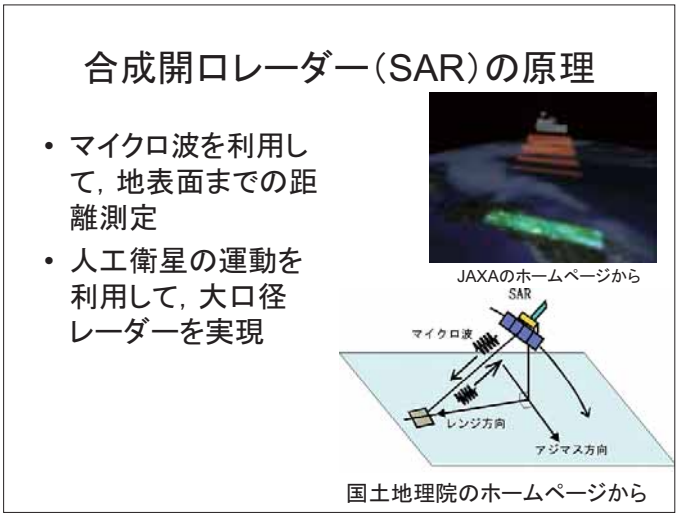


図-5　合成開口レーダー（SAR）の原理

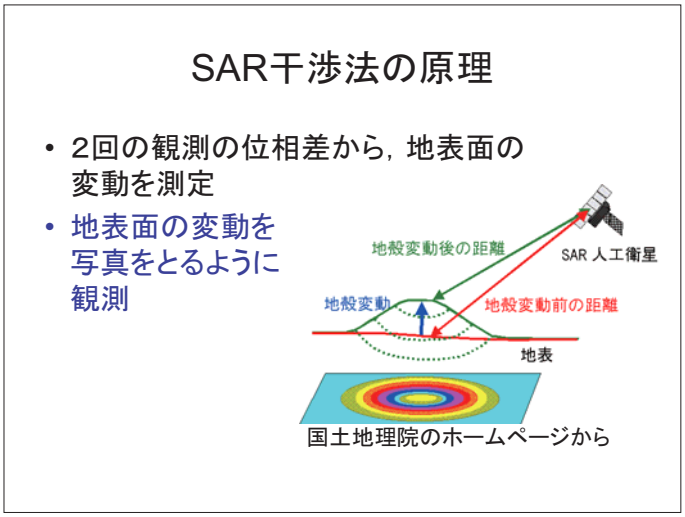


図-6　SAR 干渉法の原理

かというと、地震で生じた地殻変動の詳細を知ることによって、この地震がどういう地震であったかを調べるためには、もう少しこの中の空間密度を上げなければいけない。そこで GPS の観測点を新たに設けて研究をしたわけですが、残念ながら地震の前には置いていませんので、詳しいことがわからなかったのです。

2. 宇宙からの観測技術

人工衛星に搭載されている合成開口レーダーというセンサーを使いますと、写真を撮るように地殻変動の様子がわかります。合成開口レーダーとは、マイクロ波を使って人工衛星と地表面までの距離を測定するものですが、人工衛星に搭載しているレーダーはわずか数 m のものなので、そんな小さな口径のものですと地表の様子などは見えませんが、人工衛星は地球の周りを数時間で回る動きを利用して、仮想的に 100km などの大口径のレーダーを再現するという技術であります。それを合成開口技術と言いますが、それで地表面の写真を数 m ～ 10m 程度の高い分解能で撮ることができます。（図-5　参照）

撮った写真に対して、地震あるいは火山噴火の前と後の同じような画像を比べると距離の差が出ます。地殻変動が生じて地面が盛り上がると、距離の差が生じます。このレーダーの電波の位相の差がまさに変動量になりますので、その位相差を色の情報に直して写真のようなものをつくります。（図-6　参照）

それが合成開口レーダー干渉法というものでありまして、この最初の成果が、もう既に 15 年経ちましたが図-7 であります。この画像は雑誌「ネイチャー」の表紙を飾ったほど有名な、1992 年にカリフォルニアで起きたランダース地震という大規模な地震の画像であります。縞模様が込んでいるところほど地面が大きく動いたところであります。

現在、日本が運用している陸域観測衛星「だいち」というのがございます。これが一昨年に H－Ⅱ A ロケットで打ち上げられました。その後実際のデータを取り始めて、現在も順調に運用を続けております。「だいち」には 3 つのセンサーがあります。そのうち、光をとらえて光学写真を撮るセンサーとして、PRISM と AVNIR － 2 があります。もう 1 つが PALSAR というＬバンド・レーダーであり、波長 23.6cm の電波を出して地表面の情報を取得するものです。それで昼夜観測を行っているわけですが、PALSAR が主に観測するのは太陽の裏側に来た夜の領域だけで、昼の領域を飛んでいるときは光学センサーの観測を主として行っているようです。図-8 のグラフの横軸が電波の波長で、縦軸が大気中の透過率を示しています。波長が 1mm より短い電波は大気の中で吸収されてしまい、ほとんど大気中を透過しません。波長が長くなって

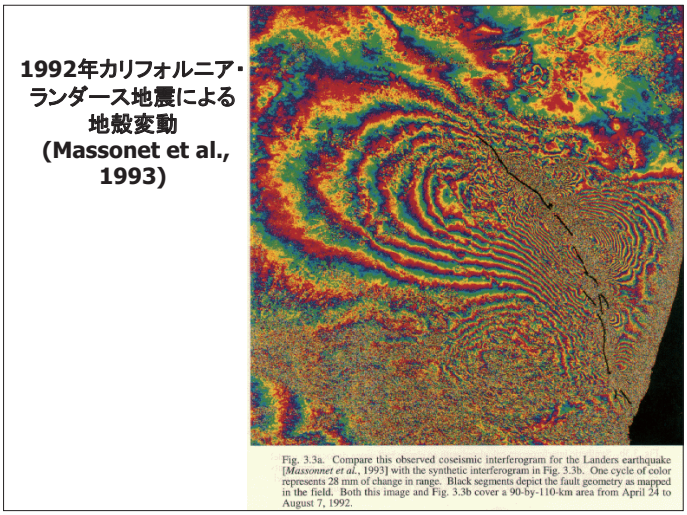


図-7　ランダース地震による地殻変動

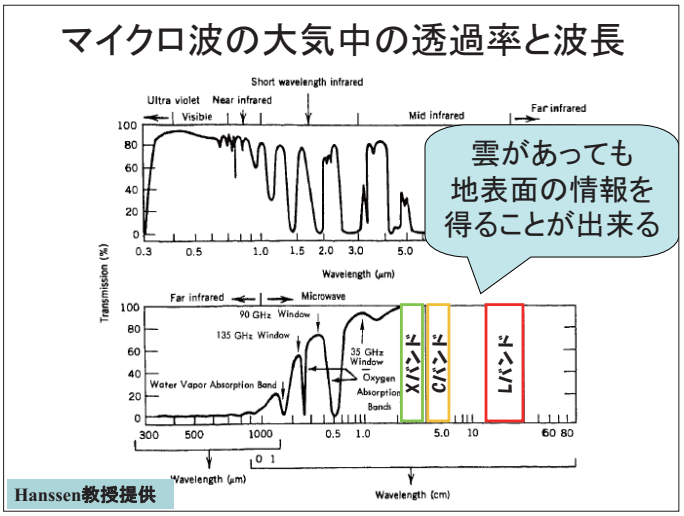


図-8　マイクロ波の大気中の透過率と波長

くるとだんだん地表に到達することができます。図に示されたＬバンドや波長が５～６cmのＣバンドや、それよりさらに短い２～３cmの波長のＸバンド、この３つの周波数帯の電波が現在世界中の合成開口レーダーで使われている波長で、これらは１００%地表まで透過するということが知られております。要するに人工衛星は大気圏外の、地表から大体７００～８００km程度の上空を飛んでいますが、衛星に用いる周波数帯はそこからの電波がちゃんと地上に到達して、さらにまたはね返って衛星まで帰ることが保証される電波の周波数帯であるということになります。光学センサーですと、雲があったら地表の様子は見えないのですが、レーダーの場合は雲があろうが、台風があろうが、ちゃんと地表面まで到達して情報を得ることができるという利点があります。現在世界では合成開口レーダーの衛星は、私の知っている限りでは　７種類飛んでいます。図-9に示すように、Ｃバンドの衛星としてENVISAT、RADARSAT、RADARSAT2があります。Ｘバンドの衛星としては、TerraSAR-X、Cosmo-Skymed2、SAR-Lupeがあります。唯一Ｌバンドというちょっと長い波長を持っている衛星は日本の「だいち」、ALOS/PALSARというセンサーです。RADARSATのＣバンドのデータを用いて解析した結果と、「だいち」の一代前の「ふよう」という衛星に搭載されているＬバンドのレーダーを用いて解析した結果を比較すると、Ｃバンドでは山地など植生の深い領域では鮮明なデータが得られませんでしたが、Ｌバンドでは森林地帯など植生の深い領域でも、鮮明なデータが得られておりました。

図-9　世界のSAR衛星

特別講演

the Content of a Lecture

3. 研究対象地域は全世界

合成開口レーダー研究は、GPSのようにセンサーをフィールド対象とする所へ設置しなくても、研究室に居ながらにしていろいろな所の研究ができるというメリットがあります。地球科学者ですからきちんと現場を見るということは大事だと思いますが、なかなか行きづらい所があるのも事実です。現在、世界中で様々な大地の変動が起きており、それらを積極的に観測しようということで、全世界を対象にこのレーダーを使って解析をしております。

研究の一例として、ハワイのキラウエア火山の観測があります。今年の初めごろにキラウエアで噴火がありましたが、それに先駆けるような変動をとらえることが出来ました。
(図-10　参照)

合成開口レーダーの結果の見方というのはなかなか難しいですが、観測した画像より地下にあったマグマの圧力が高まって地面が隆起したということがわかりました。それを弾性論のモデルを使って計算することによって、長さ数kmにわたる割れ目があって、そこにマグマが入って地面が膨らんだのだろうということが予測できました。そうしているうちに、このキラウエアでは噴火が起きたのです。このように、繰り返し観測していれば、火山噴火の予測はかなり明るい見通しが得られると考えております。

また地震や火山だけではなく、地表面で起こる変動であれば何でもとらえることができます。その一例として、一昨年の5月のインドネシアの東ジャワでの泥噴出という事件をご紹介したいと思います。ジャワ島の東部でマグニチュード6.3の地震が発生し、5,000～6,000人の方が亡くなりました。それから3日後に事件が起きました。どういう事件かといいますと、大量の泥が噴出してクレーターができてしまいました。温泉よりも高温の泥が噴き出したそうです。噴き出した泥が、周りの家屋、畑、工場を全部埋め尽くしてしまったという事件です。いまだに泥が出ているそうですが、13名の死者が出てこの周辺の1万3,000人が避難しているという状況です。

「だいち」も、この周辺の画像を取得しておりました。合成開口レーダーには強度画像と干渉画像の2つの種類の画像があります。写真のように見えるのが強度画像といいまして、地面の起伏が非常によくわかります。
(図-11参照)

注目していただきたいのは、中央上

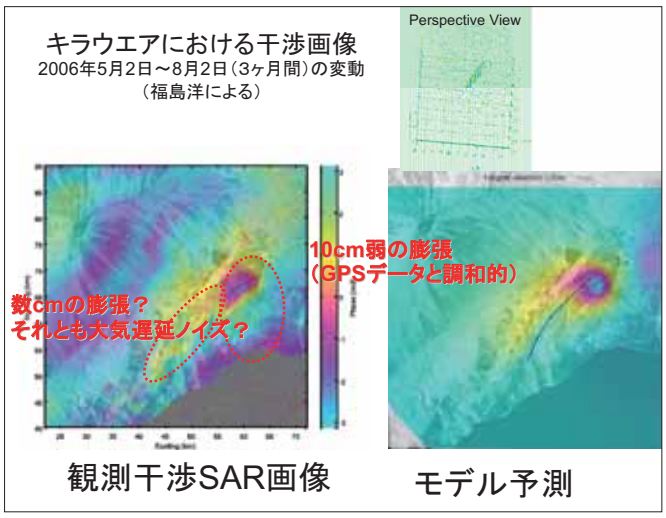


図-10　キラウエアにおける干渉画像

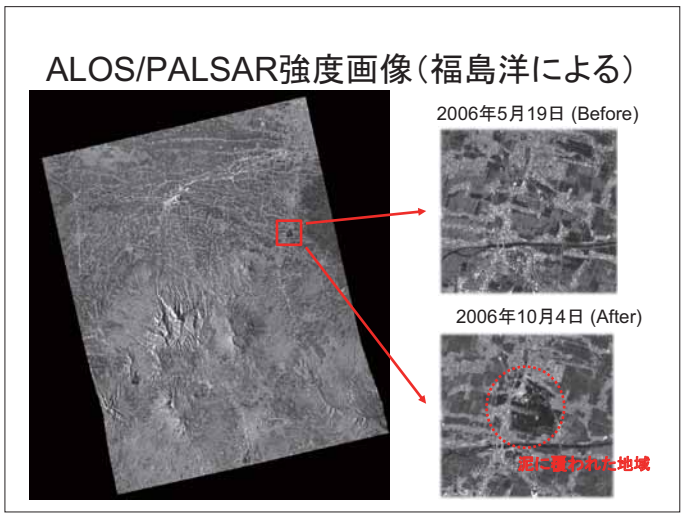


図-11　ジャワ島の泥噴出に関する強度画像

部に何か黒いものがあります。そこを拡大したのが図-11右の画像でありまして、右上が事件前で右下が事件後の画像です。ところで合成開口レーダーの電波は、地面に当たって戻ってくるものしかとらえません。水があると鏡面反射の影響で、地表面からの情報が得られなくなります。地表面から返ってきた情報が無いので、強度がゼロになります。強度画像というのは、要するに返ってきた電波の強さを表すのですが、この黒い所は電波が返ってきませんでした。事件前にはちゃんと電波は返ってきたので、事件後に水のようなものがこの地表を覆ったということがわかります。

図-12は干渉画像（拡大）です。強度画像は要するにシグナルの振幅ですが、干渉画像は位相の差の情報です。ランダース地震の画像（図-7）でも見られたように縞模様が幾筋も見えます。つまり、ここに何か大きな地面の変動があったことがわかるわけです。図-12右下の凡例のように色が青からピンク、黄色と変化していく1サイクルのことをフリンジといい、色が青から遠ざかるほど衛星からの距離が遠ざかるということになります。中央の丸で囲った部分は画像から7フリンジ程度と読み取れ、1フリンジが11.8cmなので7フリンジでは約80cm程度衛星から遠ざかったことがわかります。衛星から遠ざかるということは、この地表が窪んだということになります。ここはどうも窪んだらしい。右上の丸で囲った部分は逆に、色が青から黄色、ピンクと変わりますので、ここら辺はひょっとしたら隆起したかもしれないと読み取れます。また地表を覆った大量の泥については、深さ0.2～1.0kmぐらいに楕円体型の泥溜りがあったとモデル構築し、そこにあった泥がすべて地表面に出てきた場合どうなるかということを解析すると、観測結果と同様の縞模様が得られることがわかりました。また、泥の噴出量も約0.12km^{3}と推定されました。

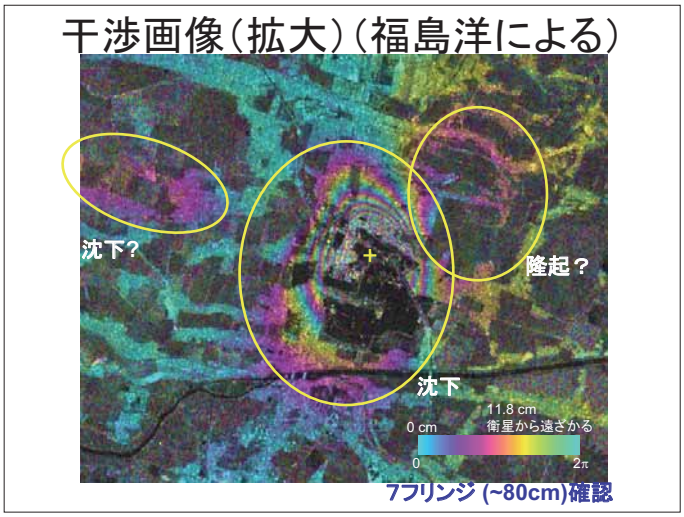
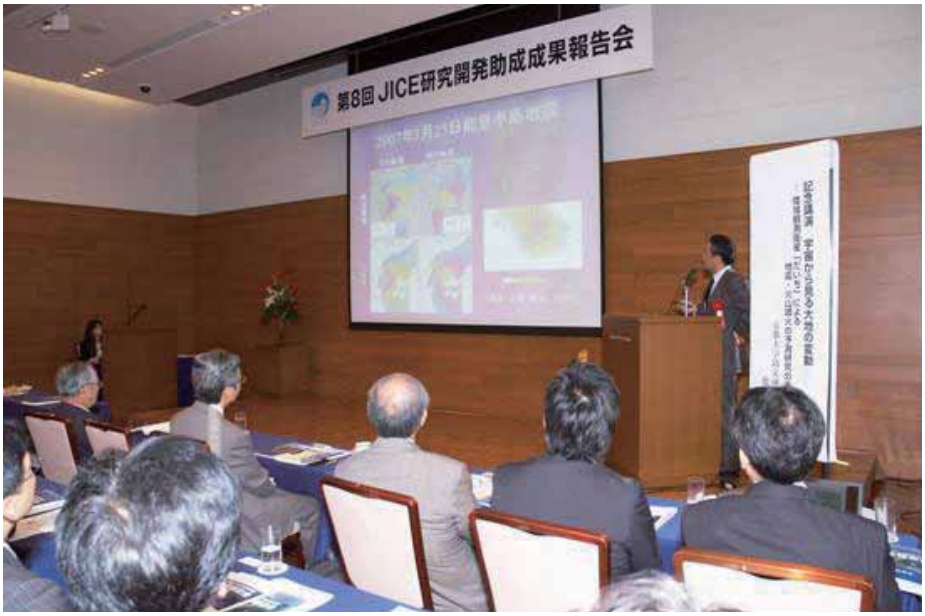


図-12　ジャワ島の泥噴出に関する干渉画像



特別講演

the Content of a Lecture

4. 中国四川大地震

今年の５月１２日に中国四川で大地震が発生しました。規制などもありGPSデータを入手することができず、また中国の研究者と共同研究をすることも難しいわけですが、「だいち」のデータがあれば四川地震がどんな地震であったかということを研究することができます。我々も地震発生後ほとんど毎日のように「だいち」から送られてくるデータを解析して、全域の地殻変動の様子をとらえることができました。それ以外にも全地球に地震の観測網がありまして、その観測結果に基づいていろいろな解析が行われています。解析の結果から、この地震は多分２つ以上の地震が組み合わさったものだろうと考えられます。１つは今年の岩手・宮城内陸地震のような逆断層型の地震が発生し、その後兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）のような横ずれ断層型の地震が発生し、そういったものが引き続いて起きたようであります。地震の規模は、岩手・宮城あるいは兵庫県南部地震よりはるかに大きいものでした。調査の結果、地震は四川盆地北西の龍門山断層（図-１３★部）という断層帯で発生したと推測されます。

図-１３は、中国の研究者がまとめたGPSの観測の結果であります。この図は、北北東に向かって移動してきたインドプレートがユーラシアプレートと衝突し、ヒマラヤ山脈やチベット高原の辺りから龍門山断層方向に向かって地殻が移動し、龍門山断層付近で地殻の移動が止まっていることを示しています。このことから、龍門山断層付近では大きなひずみが溜まっていると予測できますが、そこで今回大きな地震が発生したということになります。「だいち」からのデータを干渉画像処理して得られた結果からは、この地震は５～６つの中規模の断層が連鎖的に割れたのではないかと推測できました。干渉画像をモデル化したのが図-１４右図です。３つの小規模断層からなるモデルとなっておりますが、概ね左図の干渉画像を説明するような結果を得ることができます。この地震の特徴としては、一番震源に近いところの断層は中越地震とか岩手・宮城内陸地震のような逆断層ですが、それからすぐ北に行きますと、かなり鉛直に近い断層が右横ずれを起こした。まさに兵庫県南部地震のような地震が引き続いて起きたということが考えられます。つまり、この地震の全体像として

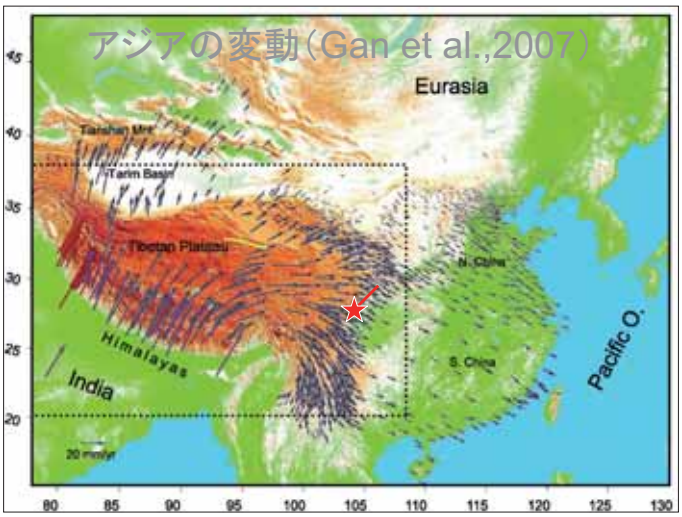


図-１３　アジアの変動

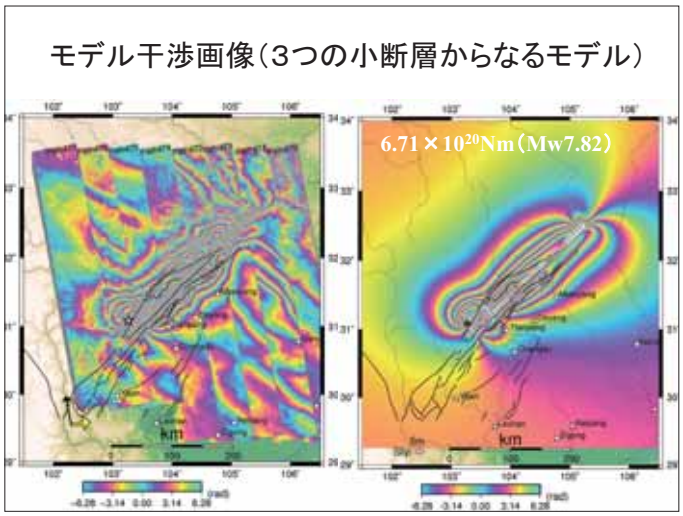


図-１４　モデル干渉図

は最初に大きな逆断層の地震が起きて、それに引きずられて同じような大きさの今度は横ずれの地震が２つ３つ続いて起きたということが考えられるわけです。

震源断層に近いところについて詳しく解析する場合は、ピクセル・マッチングと称する強度画像を解析して変位の大きいところの地殻変動を検出する手法を用います。図-15 がピクセル・マッチング画像です。中央の断層（北川断層）を境に、非常にクリアな境界があります。白くなっているのは 2m 以上衛星から遠ざかっているということを示します。北へ行くほど変位が小さくなるという特徴があります。また、北川断層のすぐ南は逆に赤いところがありまして、これは衛星に 2m ぐらい近づいたということがわかります。以上の解析結果より、実際断層はもっと北東までずっと伸びているだろうということがこの絵で読み取れます。このようにして地殻変動の全容が随分とわかるようになってきました。地震が起きてすぐに画像がとれれば、どこで大きな地すべり、あるいは構造物の被害が生じたかがわかる可能性があります。空間的な被害の分布を知ることは、防災のための非常に重要な情報でありますので、こういった強度のデータも使って、今後もいろいろと地表面の様子を見ていきたいと思っています。

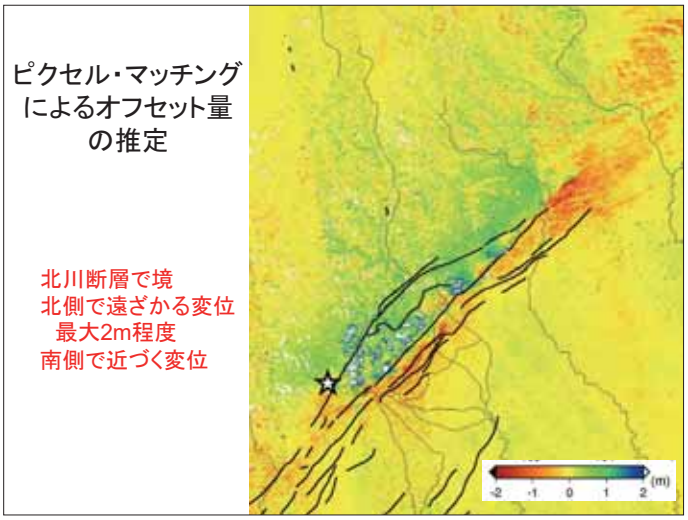


図-15　ピクセル・マッチング画像

5. 構造物等の変形のモニター

ヨーロッパでは TerraSAR-X や Cosmo-Skymed2 などの X バンドの衛星を打ち上げていますが、それは実は地殻変動観測目的というより構造物の変形、あるいは採掘の終了した岩塩や炭田などの地盤沈下を監視することに使われています。そのときに使う技術は、パーマネントスキャッタラー（永続散乱体）SAR 干渉法、略して PSInSAR と言います。我々の解析は地震前と後のそれぞれ１つのペアの画像処理でやっておりますが、この PSInSAR というのは数十枚画像を撮り、全部一気に解析し、常にシグナルが返ってきているポイントを見つけ、その変動を時系列的に追うことをしています。

オランダのグロニンゲンというところでは、PSInSAR 解析による地盤沈下監視を行っています。解析結果を水準測量の結果と照合しても同様の結果が得られており、水準測量では測れない所でも、この PSInSAR 解析をすることによって面的に地盤沈下の様子をとらえることができるという利点があります。

橋梁に対して同じような PSInSAR 解析をしますと、橋梁の変形を検出することができます。図-16 は PSInSAR 解析をした画像です。ほとんど緑色で変形はないんですが、ところどころに赤色のところがあります。そこに実際に行ってみますと、橋梁にクラックを発見されました。（図-17　参照）PSInSAR の解析の結果見えているところは、まさにそのクラックのところで年間 3mm ぐらいのスピードで地盤が下がっていることがわかってきます。また、堰堤の変形検出などにも PSInSAR 解析が使われております。ヨーロッパではこのような先進的な解析をしております。

特別講演

the Content of a Lecture

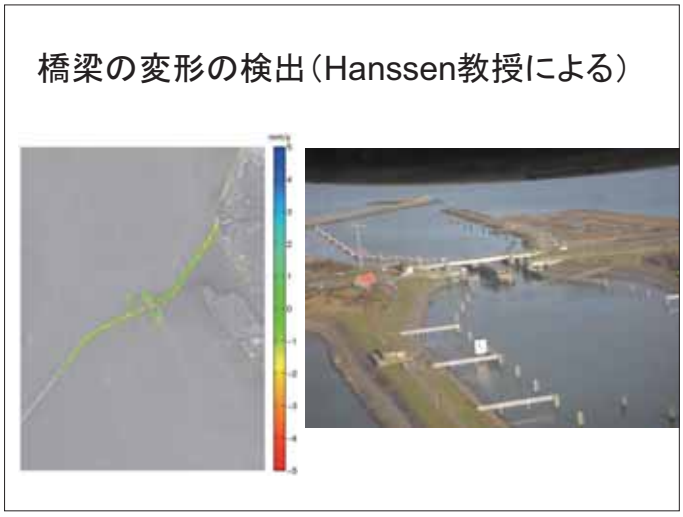


図-16　橋梁の変形検出

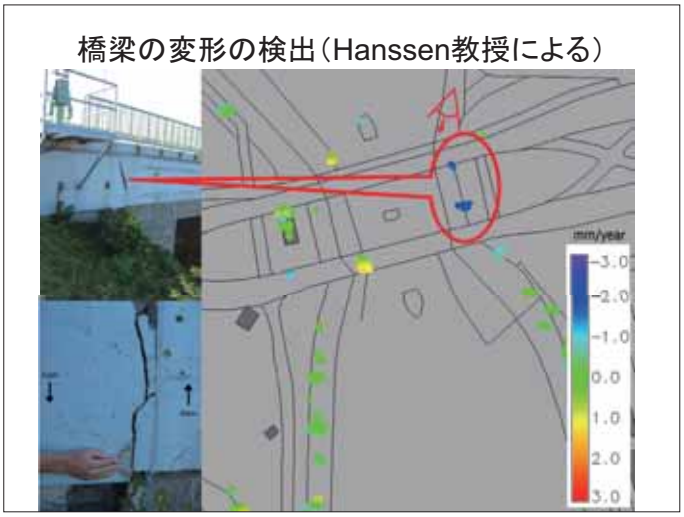


図-17　橋梁の変形検出（クラックの発見）

6. SARの利点と課題および今後の展開について

SARというのは人工衛星から観測しておりますので、地上でのチェックは当然必要でありますが、地上観測が密になくてもこういった変移を空間的に高分解能できます。1ピクセル数m～20mぐらいの高分解能で変動を検出することができます。それは先ほどご紹介した干渉法とかピクセルマッチングという方法でありますが、それ以外にもオランダの例でご紹介しましたように、新しい方法として時系列に解析するという方法があります。

PSInSAR、あるいはShort Baseline SAR等の新しい方法があり、我々も、現在研究しているところです。

SARは天候には関係なく観測が可能であること、また強度画像で大規模な変動を把握可能という利点がありますが、欠点もあります。1つは観測間隔が長いことです。「だいち」の場合は元の場所に戻ってくるのに46日という再来間隔なので、すぐにデータが入手できません。またGPSのようにXYZ方向の3つの成分が観測できず、レーダーの視線方向の1成分しか観測できないことや、観測幅が70kmと小さいことなどがあります。また、天候に影響されず観測可能と申しましたが、それはデータが得られるということであって、データの精度としては問題があります。電離層、それから対流圏の中の特に水蒸気、それから、山岳波とか、山を越えたときの気流によって干渉画像の中でもきれいに縞模様が見えるときがあります。それらをこれからどう除こうかというのが次の研究課題になっております。

今後の展開としては、南海地震に向けて日本列島がどういう変動をするかをSARでとらえたいと思っております。また、これからデータが増えますので、先ほどのヨーロッパの事例にあるように、ある地点での時系列解析を導入していきたいと考えています。

SARという技術が非常に優秀なところは、面的に写真を撮るように地表面の変動をとらえることで、これは今までの技術に無かった特徴であります。それをより高精度にするためには、大気等による誤差の補正方法を確立することや、観測幅が小さいという弱点を補うためのScan SARという広域観測モードの導入などが必要となってきます。Scan SARについては「だいち」にもその能力がありますが、まだ課題があり実用化に至っておりませんが、担当者は鋭意努力されていると

いうことで非常に期待しているところであります。

最後になりますが、SAR という技術は土木のほうでも有効だと思いますので、土木のほうからのいろいろなサジェスチョンもいただきながら、ご一緒に研究をさせていただければと思っておりますので、ご協力よろしくお願いしたいと思います。

（文責：田中　救人，栢森　俊之）