干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究
Studies on InSAR data processing technique

地理地殻活動研究センター
飛田幹男・宗包浩志・松坂　茂・加藤　敏・矢来博司・村上　亮
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Mikio TOBITA, Hiroshi MUNEKANE, Shigeru MATSUZAKA, Min KATO,
Hiroshi YARAI and Makoto MURAKAMI
測地部　藤原　智
Geodetic Department　Satoshi FUJIWARA
文部科学省研究開発局　中川弘之
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology　Hiroyuki NAKAGAWA
防災科学技術研究所　小澤　拓
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention　Taku OZAWA

要　旨

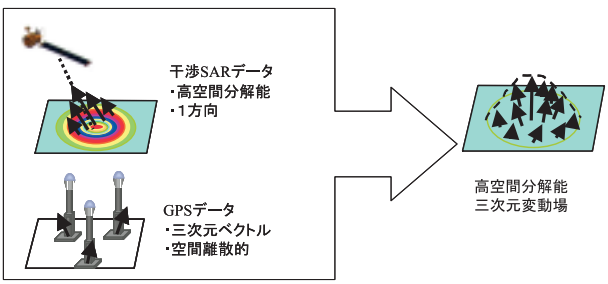
干渉合成開口レーダ（InSAR）の長所とGPSの長所を組み合わせて，面的な三次元変動場を推定することを目的として，InSAR+GPS融合を実現するプログラム・ツール群，基本データ，融合モデルを開発した。

開発した融合手法を用いて，関東平野北部の地盤沈下地帯について，JERS-1衛星のInSARデータとGPS測位データを融合し，高密度な三次元変動場を推定した。この内，上下変動場は，水準測量の結果と従来より高い一致を示し，データ融合による確度の向上が確認された。

また，本研究により，InSAR画像中の各ピクセルが高精度の経緯度座標値をもつようになり，GIS・GPSと組み合わせて，地震学・水文学の新しい調査研究手法として利用できることを示した。

１．はじめに

InSARは，画素単位で空間分解能の高い地表変位情報が得られるという長所をもつ一方，地上と衛星を結ぶ視線方向（以下，LOS：Line-Of-Sight）の変位成分しか得られないという欠点をもつ。また，GPSは，三次元変動ベクトルが得られるという長所をもつ一方，GPS受信機を設置した場所の変動しか得られないという空間分解能の限界がある（図－１）。



図－１　InSARデータとGPSデータの融合の概念図

もし，両者の長所を組み合わせることができれば，空間分解能の高い三次元変動場が得られ，地球科学分野及び災害監視分野への貢献が期待される。

しかし，実際には，様々な要因が障害となり，融合は容易ではない。

本研究では，「干渉SARデータとGPSデータから，高分解能の三次元変動場を推定する」ことを目的とし，「干渉SARデータとGPSデータとの融合手法を構築する」ことを研究目標とする。

融合を阻害する要因を取り除くために，新たに開発した実利用可能な解析技術・ツール群・基本データ等について報告する。また，これらの適用事例を示す。

２．InSARデータとGPSデータ

２．１　用いたデータ

本研究では，最終的にSARデータとして，JERS-1衛星に搭載されたSARセンサによって取得されたデータを用いた。

研究の過程で，InSARデータとGPS測位データを高度に融合するためには，InSAR解析ソフトウェアの改造が必要であることが判明したため，国土地理院が開発・使用している干渉SAR解析ソフトウェア“GSISAR”（藤原・飛田，1999；飛田他，1999，藤原他，1999；飛田，2003）を利用することとした。GSISARは，基本的に，国産のJERS-1衛星及びALOS衛星にそれぞれ対応済み及び対応予定である。

JERS-1衛星は，1992年２月から1998年10月まで運用された。ALOS衛星は当初，2002年の打上げが予定されていたが，数回の延期により，未だ打ち上げられていない。

このような理由で，今回は，JERS-1衛星により1998年までに取得されたSARデータを利用したため，それに合わせて，GPS測位データも1998年以前のものを用いた。

SARデータの内，第３章の開発，第５章の融合結果，

第６章の検証で主に用いたデータは，パス番号65，ロー番号240及び241の栃木市から横須賀市にいたる地域（図－３）の，1995年１月29日と1998年３月18日のペアである。また，GPS測位データは，この２時期の間の変動ベクトル（e，n，u）つまり（東成分，北成分，上成分）を用いた。

２．２　InSARデータとGPSデータの比較

InSARデータとGPSデータの融合という課題は，「InSAR画像ピクセル各点の三次元変動ベクトルを推定する」ということに帰着する。そのため，融合の前提として，電子基準点において，同一時期のGPS測定値及びInSARデータに矛盾がないことが必要である。

そこで，InSARデータとGPSデータの融合に先立って，同一時期，同一場所のデータが整合するかどうか調査した。

InSARでは，衛星と地表との間の距離（レンジ）の変化，すなわち，LOS（Line-Of-Sight）変動量を画素ごとに測定する。このLOS変動量をΔρ(m)とすると，

$$\Delta\rho = -(e,\ n,\ u)\cdot(e_1,\ n_1,\ u_1) \qquad (1)$$

の関係がある。ここで，$(e_1,\ n_1,\ u_1)$は，地表（ここでは電子基準点）における衛星方向を示す単位ベクトル（以下，LOS単位ベクトル）である。両ベクトルの内積をとり，符号を逆転させたものがLOS変動量Δρに等しい。

例えば，５cmの地盤沈下のみによる変動では，(e，n，u)＝（0，0，-0.05）から，

$$\Delta\rho = -u\times u_1 = -(-0.05)\times u_1 = 0.05\times u_1 \qquad (2)$$

となる。ここで，衛星は常に上にあるからu_1は常に正の符号を持つので，Δρは正となる。例えば，u_1＝0.78とすると，Δρ＝3.9cm。このように，「衛星から遠ざかる変動のLOS変動量は正になる」。

調査の結果，残念ながら，電子基準点において，GPSによる三次元変動ベクトル（e，n，u）から計算されたLOS変動量Δρは，InSARによるLOS変動量Δρとは一致しなかった。少なくとも，数センチメートルの変動量よりも，差の標準偏差が小さくならなかった。この不一致の理由として，次の要因が挙げられる。

①InSARとGPSの水平位置の違い
②InSARとGPSの固定点・固定方式の違い
③InSAR解析精度の不足
④GPS測定精度の不足
⑤季節上下変動
⑥InSARとGPSの空間・時間スケールの違い
⑦InSARのフィルターやルック処理の問題
⑧InSARのコヒーレンスが低い場所の取り扱い
⑨InSARの大気の影響

これら不一致の要因は，InSARとGPSの融合を阻害する要因に他ならない。そのため，それぞれの要因について分析し，特に①～④を解決するため，次章に述べるようなツール群及び基本データを開発した。

なお，⑤については飛田他（2004)，及び，Munekane et al.（2004）に記述が見られる。また，⑥～⑧については，今後の課題である。さらに，⑨については，藤原他（1999)，島田（1999)，中川（2001）にも記述があるが，非常に重要かつ複雑な課題であり，本研究では扱わない。

３．融合に必要なツール群・基本データ

３．１　位置を合わせるツール・基本データ

InSAR画像中の各ピクセルについて，緯度・経度の座標値を正確に知るのは容易ではない。衛星位置・観測方向の誤差，フォアショートニングの効果（SAR画像特有の山が衛星側に倒れ込む効果）によって，１kmを超える位置誤差が容易に入り込むからである。

２．２節①の融合阻害要因を除去するには，位置誤差を10m程度にしたい。幸い日本には，日本国土を覆う「数値地図50mメッシュ（標高)」が2000年までに整備されたので，これを利用する。

InSAR画像中から地形縞を除去する目的で，DEMを参照してInSARシミュレーション画像（simulated interferogram）を作成する際，DEMが持つ経緯度情報をピクセル毎に保存する。その後，InSAR画像とInSARシミュレーション画像の位置合わせを0.1～0.2ピクセル精度で行うことにより，結果的にInSAR画像中の各ピクセルの緯度・経度を約10mの精度で知ることができる。

約50m間隔のDEMを参照して，その間隔よりも細かい約10mの精度で水平位置を知るのは，一見困難にも思えるかもしれない。しかし，1/32ピクセルの分解能で，つまりサブピクセルレベルの画像マッチング法を用いて，数100点の対応点でのピクセルオフセットを求め（飛田他，1999)，さらにχ^2検定と対応点分布評価値を用いることにより（飛田・松坂，2002)，この精度を達成している。

今回の研究対象場所である関東平野は，地形の起伏が極めて少なく，InSAR画像とInSARシミュレーション画像との位置合わせは，日本で最も難しい地域である。そのため，従来，手作業での位置合わせが必要とされてきた。しかし，InSAR画像の代わりに，InSAR画像と同一座標のマスター画像を位置合わせに利用することで，高い相互相関係数を得られることが判明した。この「マスター画像をInSARシミュレーション画像との位置合わせに使用する」という新しい方法を用いることにより，ほぼ自動で高い精度の位置合わせができるようになった。

従来，InSARシミュレーション画像の作成には，「数値地図50mメッシュ（標高)」をそのまま用いてきた

が，２つの点で改善の余地があった。ひとつは，データグリッドが日本測地系で定義されていたこと，次に，本来使用されるべき楕円体高の代わりに標高を用いていることである（飛田，2002c）。

これら，２つの問題は，2001年に「日本のジオイド2000」及び「世界測地系移行のための座標変換ソフトウェアTKY2JGD」が国土地理院によって整備され，解決される環境が整った。図－２に示すように，日本測地系に準拠する「数値地図50mメッシュ（標高）」，及び，世界測地系に準拠しGRS80楕円体面上のジオイド高を格納した「日本のジオイド2000」について，TKY2JGD（飛田，2002a；飛田，2002b）を用いて，その座標系及び楕円体を統一し，「日本のDEHM」を作成した。この計算処理には，並列計算機を用いて，数ヶ月を要した。（飛田，2002c）

DEHMは，Digital Ellipsoidal Height Modelを意味する造語である。DEMと似ているが，高さの基準面が，DEMに対するジオイド面と異なり，地球楕円体（GRS80楕円体）である。

図－２　基本データ「日本のDEHM」の作成

世界測地系に準拠した日本のDEHMは，GPSとの位置合わせを実現するために必要な基本データであるだけでなく，InSAR処理の自動化にも有効である。従来は，InSARシミュレーション画像の作成前に，DEMの切り出し作業として，地図を片手に会話的な作業が必要であったが，DEHMではこれが不要となった。日本全土の楕円体高がDEHMの１ファイルに高速アクセス可能な形式で格納されたため，切り出し作業が不要になったのである。

世界測地系に準拠した日本のDEHMを読み込み，InSARシミュレーション画像を作成するプログラム“SimDehmH.c”を開発した。これに後述の“geocodbl.c”の機能を合わせて，世界測地系に準拠したピクセル座標値（経緯度）が得られることとなった。これにより，日本において２．２節①の融合阻害要因は解決した。

DEHMの整備されていない外国の場合，“SimDemH.c”を用いて，ピクセル位置が得られるが，DEMの切り出し作業は従来どおり必要である。

３．２　固定点の取り方・固定方法を整合させるツール

GPSによる三次元変動量をベクトル表示する際には，通常，表示対象エリア近傍の最も安定と考えられる観測点（例えば，八郷93002）を固定し，変動がなかったものと仮定して，表示が行われる。InSARによる変動量も同様に，画像中のある場所で変動量がないものと仮定して，LOS変動量をInSAR画像として表現する。しかし，SARを搭載した衛星の位置情報が数センチレベルの精度を持たないこと等が原因で，InSAR画像内で，平面，あるいは，なめらかな曲面状の位相の曖昧さが残ってしまう。

GPSでは，１点固定すれば，三次元変動ベクトルが計算・表示可能であるのに対し，InSAR画像では，互いに離れた３点以上の固定点を使用する必要がある。

このように，GPS及びInSARは，どちらも絶対的な三次元変動ベクトルを表現しているわけではないため，単に，同一点の変動量を比較しても，不一致を避けられない。

両者を一致させるため，GPS点において，InSARによるLOS変動量Δρ がGPSに合うように調整することとした。ただし，この調整には条件が課せられる。調整は，衛星軌道不確定さに起因する位相曲面として残り得るバイリニア曲面に限ることとした。

調整は，LOS方向と衛星進行方向の２軸からなるレーダー座標系において行う。InSAR画像の４隅の座標を（０，０），（１，０），（０，１），（１，１），また，それぞれの点におけるLOS変動量Δρの補正量をZa，Zb，Zc，Zdとしたとき，画像内の任意の点（X，Y）における補正量Zは，バイリニア曲面を表す次式で計算される。

$$Z=(1-X)(1-Y)Za+Y(1-X)Zb+X(1-Y)Zc+XYZd \qquad (3)$$

バイリニア曲面を決定する４つの変数Za，Zb，Zc，Zdは，GPS点において，「InSARによるLOS変動量Δρが（1）式から計算されるGPSによるΔρと最も良く整合するように」最小二乗法によって決定される。ただし，ここで使用されるGPS点は，InSARデータと同期間の変動データが利用可能なGPSデータが存在する点に限られる。

これを実現するツールは“flatgps.c”で，２．２節の②の融合阻害要因を取り除くためのツールである。

この調整は，原理的にレーダー座標系でのみ行われるべきであり，ジオコード（geocoding）後の画像に適用してはならない。

３．３　InSAR解析精度の向上

２．２節の③に対応するInSAR解析精度の向上は，主に３つのツール開発による。

第一に，レンジ方向に２次式で近似される残位相，すなわち，“かまぼこ型”の残位相（Tobita, 1998）を生み出す原因を解明した。衛星間を結ぶ基線ベクトルのLOS方向の成分$B_{//}$が誤差をもつと，かまぼこ位相が生ずる。今回，かまぼこ位相に対する基線ベク

トルの$B_{//}$成分の補正量の関係を定式化し，ツール群“jei2baseH.c”及び“kamaboko.c”他を開発した。従来，２次式により近似していたかまぼこ型の残位相について，厳密に除去し，精密に基線ベクトルを推定可能とした。

第二に，LOS単位ベクトルの厳密な値を求めるアルゴリズムを開発した。LOS単位ベクトルは（1）式によって，GPSデータとInSARデータを結びつける重要な量である。従来，LOS単位ベクトルは，InSAR画像中一定とし，シーンセンターにおける入射角及びトラック角を用いて計算，あるいは，入射角の代わりにオフナディア角を用いて計算，あるいは，典型的な設計値を用いて計算されるなどしていた。

しかし，LOS単位ベクトルは，レンジ位置に大きく依存するだけでなく，楕円体高及びドップラーセントロイド周波数にも依存し，従来の方法では最大10％を超える誤差を避けられない。そこで，レンジ位置，アジマス位置はもちろん，楕円体高及びドップラーセントロイドについて，各ピクセル毎にシミュレートするアルゴリズムを，InSAR画像シミュレーションプログラム“SimDemH.c”及び“SimDehmH.c”に付加した。また，ピクセル位置を与えLOS単位ベクトルを取り出すツール“ra2enu.c”を作成した。

第三に，ジオコード・アルゴリズムを大幅に見直し，“geocodbl.c”を開発した。ジオコードは，レーダー座標系で格納されたInSAR画像の各ピクセルについて，フォアショートニング他の影響を考慮し，DEMまたはDEHMに基づく座標値（経緯度）情報を与える処理である。改善点の主なものは，次のとおりである。

（ア）解像度を４倍以上向上。
（イ）位相精度を向上（LOS変位換算で最大９mm）。
（ウ）振幅精度を向上。
（エ）ピクセル位置精度を向上（最大240m）。
（オ）マスター画像と同一レーダー座標系での経緯度ファイル及びLOS単位ベクトルファイルを作成する機能を追加。
（カ）ArcViewにInSAR画像を引き渡すためのWorldファイルを作成する機能を追加。
（キ）結果ファイルの最適な出力経緯度範囲を自動的に計算する機能を追加。
（ク）出力ファイルの各ピクセル位置が循環小数でない切りの良い経緯度（度単位）値をもつように，出力解像度を14パターンから選択する機能を追加。

３．４　データ融合を実現するツール

GPS点において比較可能なデータであるLOS変動量を（1）式によりGPSデータから計算するツール“bl2ra.c”，“ra2enu.c”，“enu2phi.c”，及び，InSAR画像から抽出するツール“ra2phi.c”を開発した。サブピクセルレベルでの高精度な参照が実現されている。

融合の最終段階として，GPS点以外のピクセルにおいて，融合モデルに基づいて，三次元変動量の各成分（e，n，u）を計算するツールが必要である。融合モデルについては，第４章で記述するが，今回は「地盤沈下モデル」を実現するツール“fusion_u.c”を開発した。

３．５　GPS測定データの扱い

２．１節で述べたように，1998年以前のGPSデータを用いたため，GPSの配点密度と測定精度は，現在と比べてかなり劣っている。

主な理由は，観測時間及び時間帯である。1995年１月下旬までは，GEONETの観測時間は，１日あたり６時間観測で，観測時間帯が一定ではなかった。1995年１月下旬に順次，時間帯固定の12時間観測に移行し，さらに，1996年３月から24時間観測となった。また，軌道暦や解析ストラテジーも現在のものほど高精度ではなかった。

以上の理由で，InSARによる計測で特に感度の高い上下変動成分に関して，GPSの時系列に10cm以上のばらつきが見られ，２期間の変動成分uの確度に１cmを超える誤差が生じていた。

今回は，時系列データから，手作業で異常に大きな残差をもつデータを除去し，各変動成分の確度を確保した。高精度な時系列観測が可能となった現在のGEONETにおいては，このような手作業は不要と考えられる。

InSAR画像範囲（図－３）の23点の電子基準点から，データが得られたが，結果的に不一致の大きかった６点のデータを使用しないことで，InSARとGPSのLOS変位が標準偏差4.5mmで一致した。

削除された６点は，川越，守谷，秋川，千葉市川，二宮，横須賀の各点である。

不一致が大きかった原因として，InSARデータ，GPSデータ，結合部分の３つが考えられるが，興味深い原因究明は今後の課題としたい。

４．融合モデル

GPSによる三次元変動ベクトルのないInSAR画像ピクセルの三次元変動ベクトルをどのように推定するかを決める考え方をここでは“融合モデル”と呼ぶ。

融合モデルは，先験的に与える必要がある。GPS点の点間隔に対して，変動場の波長が大きいか，同等の場合には，たとえば，マルコフ確率場モデルが有効に機能するようである（Gudmundssen, 2002）。しかし，直下型地震に伴う地殻変動や地盤沈下等，変動場の空間スケールが，GPS点の点間隔より小さい場合には，有効ではない。

そこで，先験的に融合モデルを仮定することにより，より真実に近い三次元変動ベクトルを推定できる。本研究では，次のような４つの融合モデルを考えた。

これらのモデルを対象変動場に合わせて適切に選択

する必要がある。

４．１　地盤沈下モデル

「地盤沈下モデル」とは，GPSの（e，n，u）からテクトニックな広域変動場を推定し,これに合わないInSARによるLOS測定値は地盤沈下であると考えるモデルである。今回，関東平野のInSAR画像に適用し，融合結果を第５章に示す。

４．２　LOS直交平面GPSモデル

「LOS直交平面GPSモデル」では，InSARによるLOS測定値はそのまま採用し，LOSに直交する平面のベクトル成分をGPSデータから推定する。

４．３　GPSは方向，SARは大きさを決定するモデル

このモデルでは，GPSデータは変動ベクトルの方向のみを推定するのに用い，大きさはLOS測定値を採用する。

このモデルには２つの欠点がある。第一に，GPSデータから推定された変動ベクトルの方向がLOSに直交する方向に近いとき，推定されるベクトルの大きさが著しく大きな誤差をもつ。第二に，GPSデータから推定された変動量のLOS方向成分の符号が，InSARによるLOS変動量の符号と異なる場合，融合モデル自体に矛盾が生じる。

４．４　断層モデルを用いる融合モデル

「断層モデルを用いる融合モデル」では，GPSデータとそれに整合するLOS測定値の両方を用いて断層パラメータを推定する。InSARデータは，多くの拘束条件を与えるだけでなく，地表地震断層及び地震断層位置の特定にも利用可能である。GPSデータは，InSARによるLOS測定値をGPSと共通の固定方式とし，確度を向上させるためにも利用される。

５．融合結果

本研究により開発した融合のためのツール・基本データを関東地方に適用した。この地域を選んだ理由は，検証（第６章）のための独立の高精度な観測値である水準測量データが得られるからである。

５．１　InSARとGPSによるLOS変動量の比較

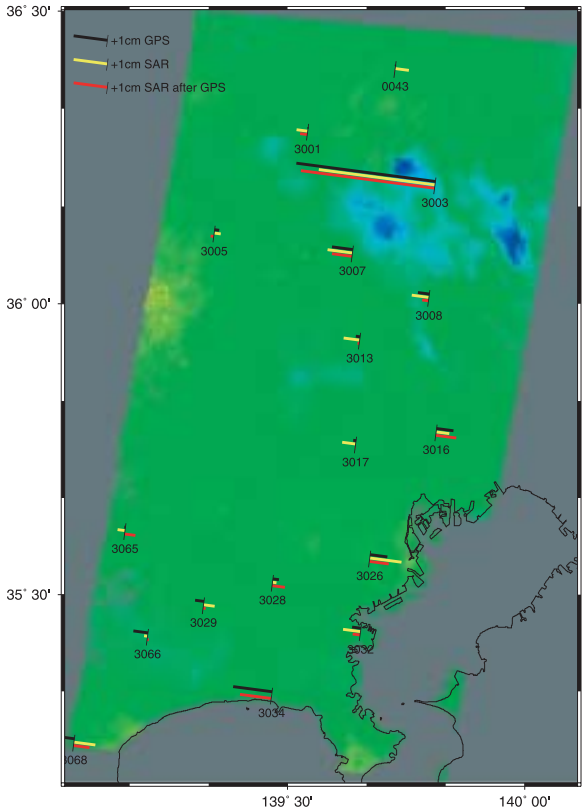
図－３に，GPS点におけるLOS変動量について，GPSデータから計算したもの（１段目の黒い棒），InSARから得られたもの（２段目の黄色い棒），InSAR+GPS融合によって得られたもの（３段目の赤い棒）を示した。

この画像データを取得した際，JERS-1衛星は，画像の地域に対し東南東方向（方位角約97°）の太平洋上空にあった。“0043”などの番号は電子基準点の観測点コード“940043”の略である。LOS変動量の棒が左（西北西）に出ているものは，LOSが増加，すなわち，SAR衛星から遠ざかるセンスであることを示す。例えば，3003すなわち93003三和の電子基準点では，5.2cmの地盤沈下（GPSのu成分）による影響のため，+4.1cmのLOS変動量（黒い棒）をGPSが観測している。一方，InSAR画像から得られた三和点のLOS変動量（黄色い棒）は，+3.4cmで一致しない。３．２節で述べた“flatgps.c”によって，固定点の取り方・固定方法を一致させることにより，4.0cm（赤い棒）に修正され，GPSとの一致度が向上した。

同様に，他の電子基準点でも，固定点の取り方・固定方法を一致させることにより，一致度が向上した。

従来，GPS（黒）とInSAR（黄）から得られたLOS変動量は，図－３と比較して，もっと食い違うことが多かったが，ピクセル位置の高精度化，InSAR及びGPS解析精度の向上等，本研究による改善で，初期（固定方法を一致させる前の黒と黄）から一致度が向上した。

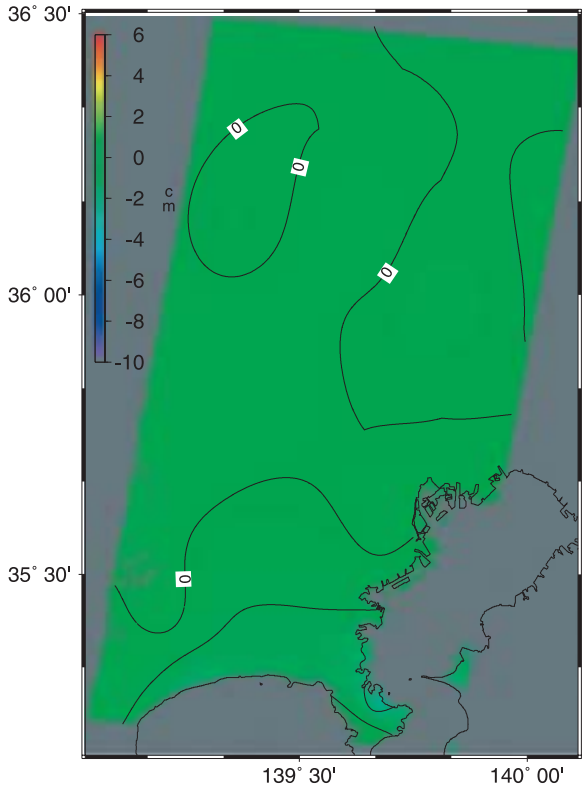
結果的に電子基準点17点におけるLOS変動量のInSARとGPSの差の標準偏差は4.6mmとなった。



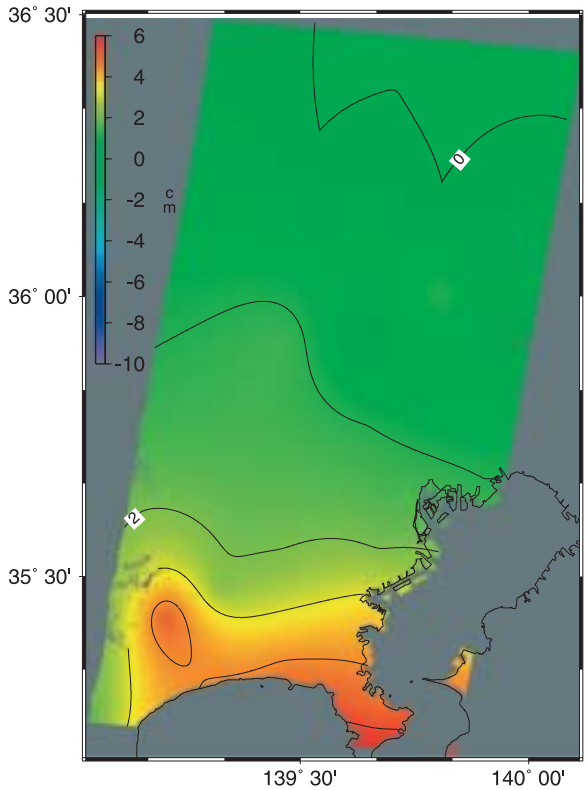
図－３　InSARとGPSによるLOS変動量の比較。
パス番号65；ロー番号240及び241の栃木市から横須賀市にいたる地域の，1995年１月29日に対する1998年３月18日のLOS変位。固定方法の改善（３．２節）によって，GPS（黒）との一致度の改善（黄→赤）が見られる。緑で塗られた画像部分は，InSAR画像中LOS変位がゼロの部分で，北部の青及び紫の部分は，地盤沈下によるLOS変位が＋数cm～＋10数cmの地域。

５．２　InSAR+GPS融合による三次元変動場

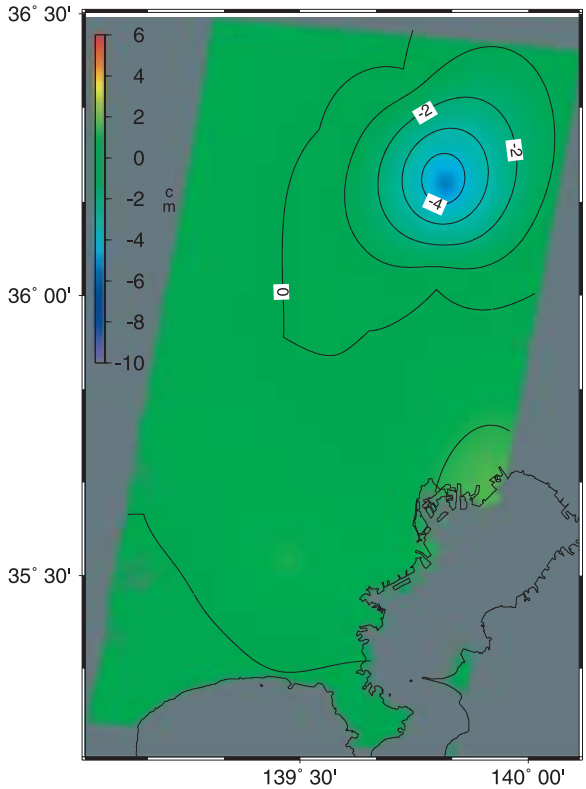
図－４～６は，GPS点における1995年１月29日に対する1998年３月18日の変動の東成分（図－４），北成分（図－５），上成分（図－６）から，InSAR画像の各ピクセルにおける各成分を，Kriging法によって推定したものである。外挿補外による誤差を避けるため，



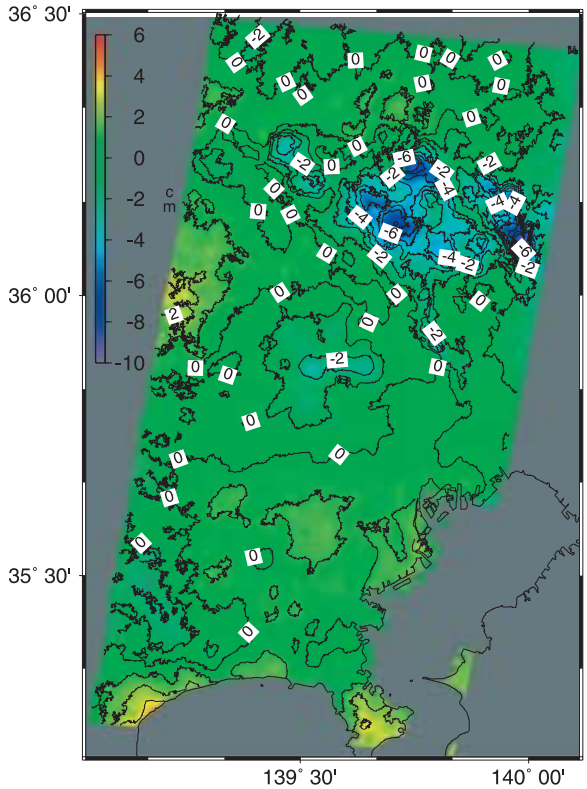
図－４　InSAR+GPS融合による三次元変動場の東成分
1995/1/29～1998/3/18　単位はcm



図－５　InSAR+GPS融合による三次元変動場の北成分
1995/1/29～1998/3/18　単位はcm



図－６　GPSによる三次元変動場の上成分
1995/1/29～1998/3/18　単位はcm



図－７　InSAR+GPS融合による三次元変動場の上成分
1995/1/29～1998/3/18　単位はcm

InSAR画像内のGPS点23点に加え，InSAR画像外のGPS点20点（図－３には含まれない）を含めた合計43点の各成分を基に，内挿推定を行った。

４．１節で述べた地盤沈下モデルを採用したので，最終的なInSAR+GPS融合による三次元変動場の東成分（図－４），北成分（図－５）は，GPSによる広域地殻変動場そのものとなっており，InSARデータには依存しない。一方，上成分は，GPSだけから得られた変動場（図－６）とInSAR＋GPS融合結果の上成分（図－７）は，空間密度が全く異なる。

融合結果の上成分（図－７）は，GPSの力を借りて上下成分の分離がなされ，また，従来より確度が向上しただけでなく，InSARの高分解能であるという長所が生かされている。

従来，InSARデータから地盤沈下の等量線図を描く際には，「InSARによるLOS変動量はすべて上下変動に起因すると仮定」していた（例：中川他，1999；加藤他，2003）のに対し，図－７では，LOS変動量への水平変動の寄与と上限変動の寄与が分離されている。従来の仮定は，大きく間違っていたわけではないが，今回，このような仮定に依存せず，実データに基づく上下変動図が得られた。

図－７と同じ上下変動図に市町村界を描いたものを図－14として掲載する。石下町，水海道市，下妻市，野木町，栗橋町，鷲宮町，幸手市，千代川村，八千代町，五霞町，大利根町，古河市，北川辺町，大利根町，総和町，三和町，加須市，板倉町，関宿町，境町，邑楽町，明和町，越谷市，春日部市，さいたま市，上福岡市，浦安市等で，10数センチ～数センチメートルの地盤沈下が見られる。

６．水準測量データによる検証

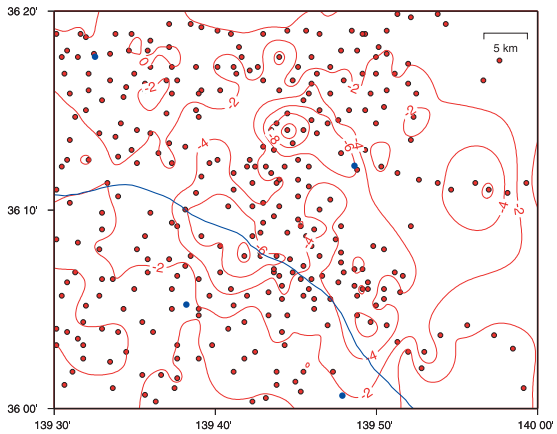
第５章で示した融合結果がどの程度の確度をもつのかを検証し，目的が達成されたか確認する。検証を行うため，独立な外部のデータである水準測量データと比較を行う。

検証は，図－８のように関東平野北部の栃木，群馬，埼玉，茨城，千葉各県の境界付近の地盤沈下地帯で行った。水準測量の基準日は，InSAR+GPSの基準日と約３ヶ月の違いはあるが，期間はどちらも約３年であり，ここでは同一期間とみなす。

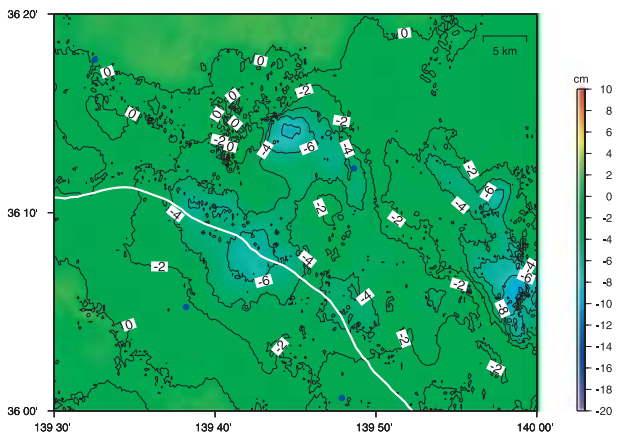
独立な観測手段で測定した上下変動図である図－８と図－９を比較すると，全体的に空間分布と大きさが良く一致している。

等高線の滑らかさとパターンが異なっていることの主な原因は，等高線を描くために使用した元データの空間密度の圧倒的な違いである。

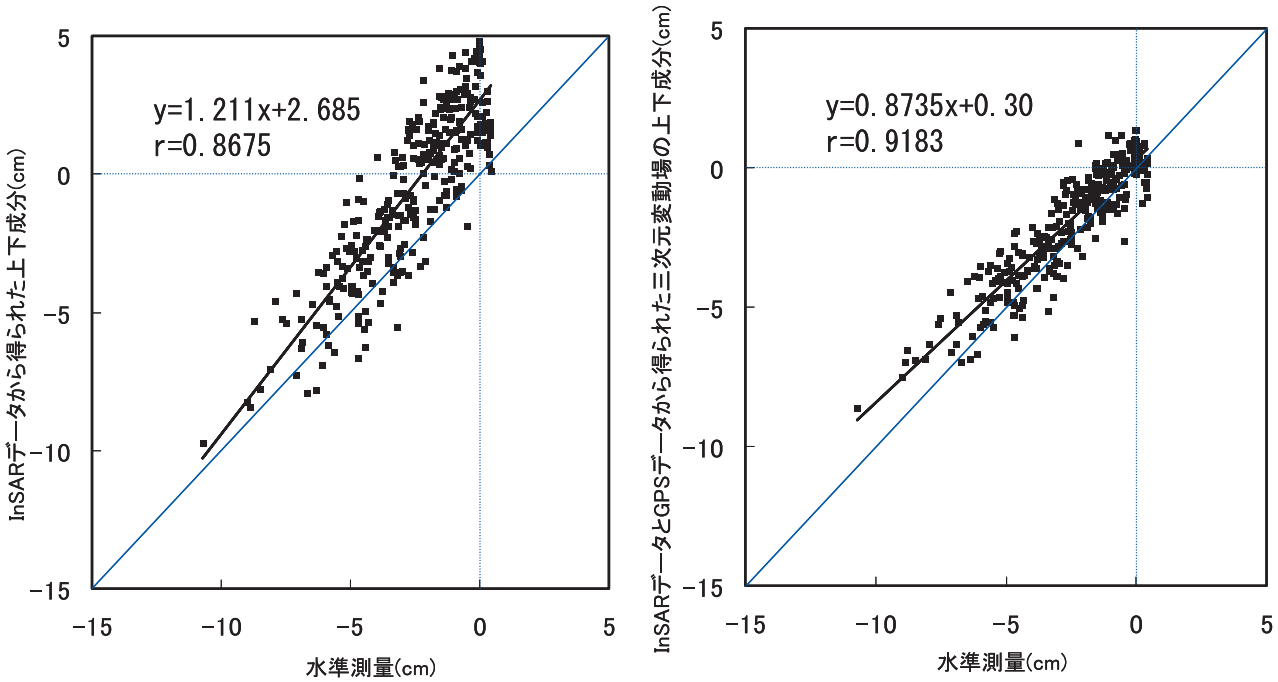
図－９の右端少し下（36°04’，139°58’付近）に見られる10cmを超える地盤沈下は，図－８の水準測量結果には見られない。この食い違いの原因は，水準測量路線が通っていないため，水準測量では検出されていないことである。この石下町の地盤沈下は，これまで監視対象とされていなかったが，InSARの「面的にくまなく地表変位の計測ができる」という，いわゆるサーチ機能によって，検出されたわけである。



図－８　水準測量結果　1995/1/1～1998/1/1
赤い点は水準測量基標322点。赤い等高線は，水準基標における水準測量結果から推定。単位はcm。マイナスは地盤沈下。青い曲線は利根川。



図－９　InSAR+GPS融合結果　1995/1/29～1998/3/18
単位はcm。マイナスは地盤沈下。白い曲線は利根川。４つの青い点は電子基準点。



図－10　正確さの検証：独立な水準測量結果との比較。従来の「InSARデータだけから得られた上下成分」（左）に対し，今回の「InSAR+GPS融合による三次元変動場の上下成分」（右）を比較すると，ｙ切片，及び，相関係数に改善が見られる。

次に，水準測量データを基準として，定量的な検証を行う。図－10に，従来の「InSARだけから得られた上下成分」（左），及び，今回の「InSAR+GPS融合による三次元変動場の上下成分」（右）を縦軸にとった散布図を示す。上下変動成分に測定誤差がない理想的な場合には，y切片がゼロで，傾きが１の青い直線上に，322個の黒い正方形がプロットされるはずである。

図－10（左）では，y切片が2.7cmであり，水準測量で上下変動がない場所で，2.7cmの隆起がInSARデータに見られることを示している。一方，図－10（右）では，y切片がわずか３mmに改善しており，GPSの力を借りてオフセットがほぼ解消し，確度が向上している。同時に，相関係数が約５％向上しており，InSAR解析精度の向上による成果が現れている。

以上の検証により，本研究によって開発されたツール群・基本データ，及び，融合モデル（地盤沈下モデル）が有効であることが確認された。

７．本研究の効果

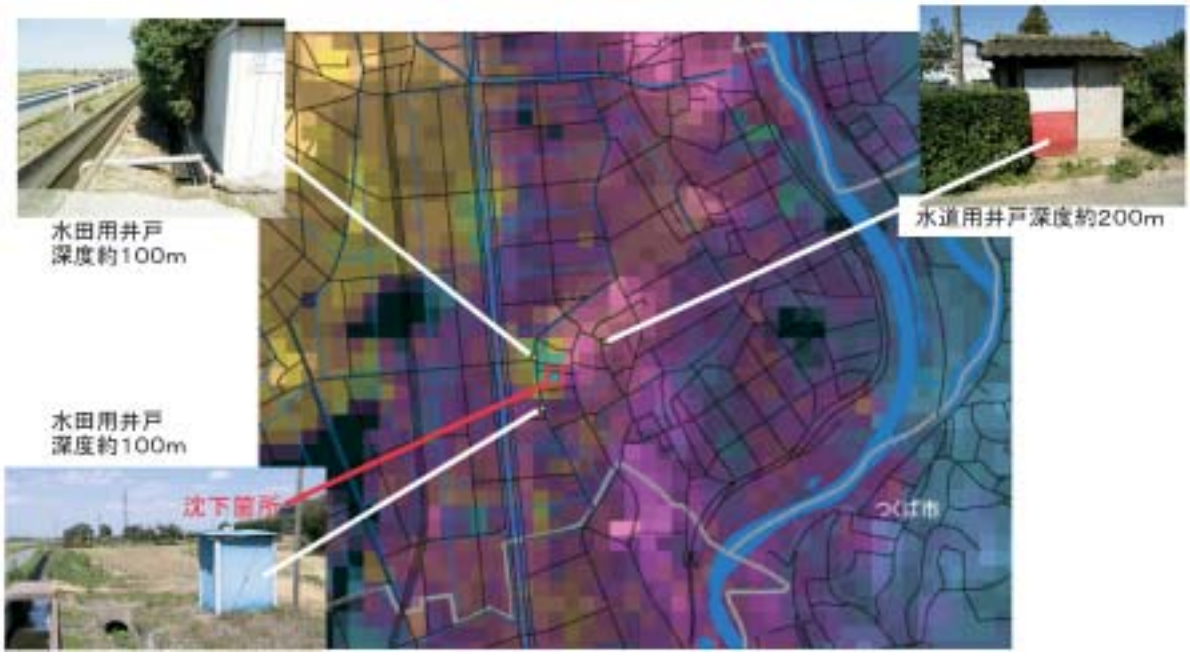
本研究では，InSAR+GPSの融合という目的を達成したと同時に，次に示すような副次的効果，干渉SAR解析ソフトウェアの改善，新しい知見をもたらした。

７．１　ピンポイントでの変動計測

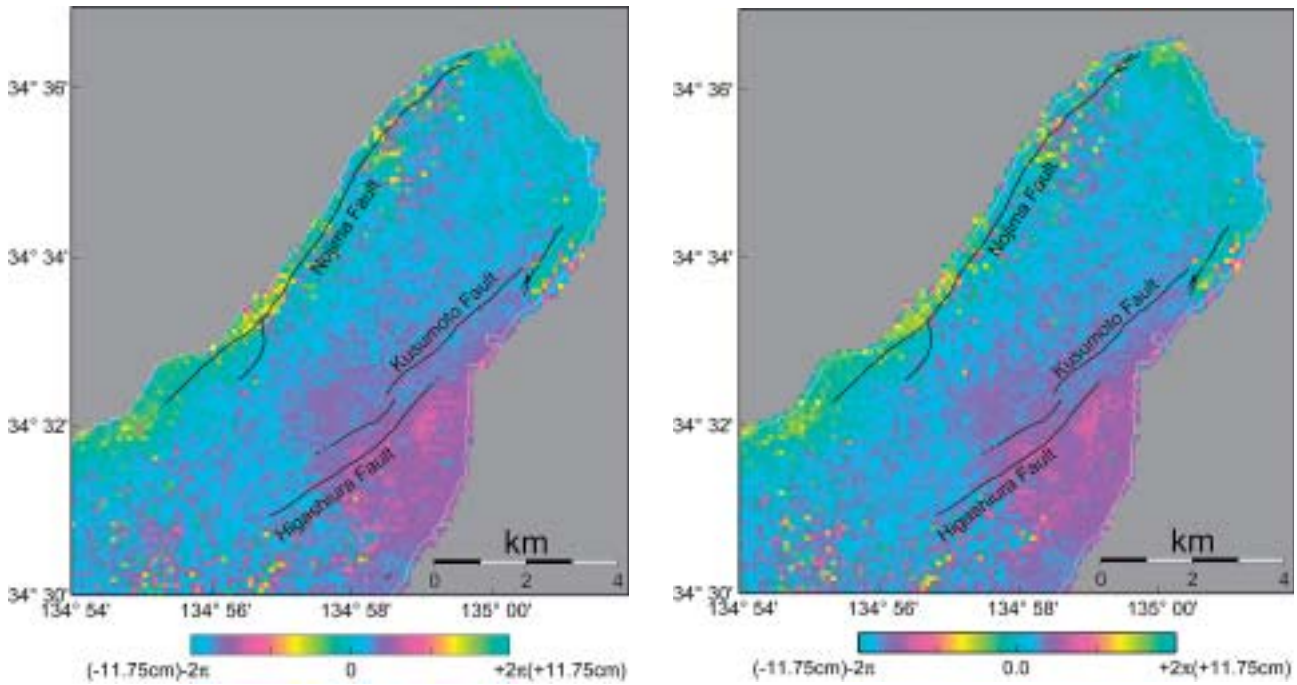
図－11に，InSAR画像を基にした現地調査による，深井戸と地盤沈下箇所の関係の把握について示した。ピクセルサイズ約60mのピクセルにおける沈下量をカラーで表したInSAR画像上に，ArcViewにより道路（黒線）と水路（青線）を重ねたもので，1995年１月29日に対する1998年３月18日の沈下量を示している。この地域は，平均して約８cmの地盤沈下が見られるが，中央付近の赤い長方形で囲んだ領域では，局所的に，周囲より約８cmの沈下，合計約16cmもの沈下が見られる。

従来とは異なり，InSAR画像の各ピクセルが世界測地系における正確な経緯度を持つため，カーナビ及びハンディGPSを利用してピンポイントで現場に到達できた。ただし，カーナビは日本測地系に準拠している（2004.12現在）ので，TKY2JGDを使用して座標変換した経緯度をカーナビに入力した。また，InSAR画像とGISの親和性を高めたことで｛３．３節（カ）参照｝，ハンディGPSによる経緯度座標値を，GISの機能により地図上にプロットして，迅速に位置関係を把握できる。

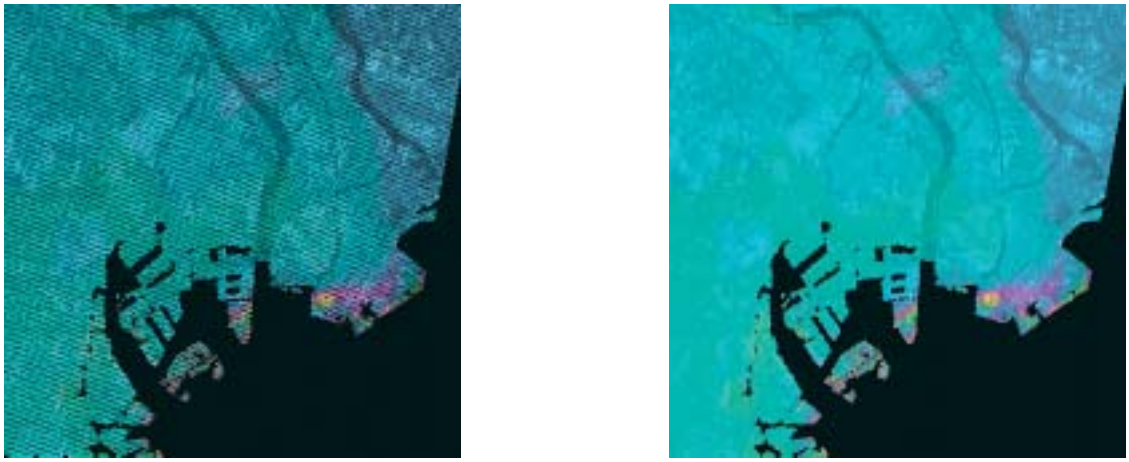
調査の結果，約16cmの沈下箇所の周りには，３つの深井戸があり，井戸の空間密度が高い場所で沈下が大きいことが判明した。



図－11　**InSAR**画像を基にした現地調査による深井戸と地盤沈下箇所の関係の把握。約60m間隔のピクセルの沈下量をカラーで表した**InSAR**画像上に，**ArcView**により道路（黒線）と水路（青線）を重ねたもの。1995年１月29日に対する1998年３月18日の沈下量を示している。



図－12　ジオコード手法の改善（３．３節参照）による，より正確な兵庫県南部地震余効変動の把握。（左）改善前，（右）改善後。1995/2/6に対する1998/3/26の**LOS**変動量。野島断層南端部，楠本断層・東浦断層において，断層の北西側が,南東側に対して，衛星に近づく方向に変位したことを示す地殻変動が見られ，それぞれの変位量は視線方向成分で約３**cm**と約２**cm**である。活断層の位置は（国土地理院，1995）から読み取った。白い海岸線は数値地図25000（行政界・海岸線）にもとづく。（**Ozawa, et al.,** 2004）



図－13　ジオコードプログラム“geocodbl.c”の改善による解像度の改善。改善前（左）と改善後（右）。1995/1/29～1998/3/18の約３年間に，右下のテーマパークで10cmを超える地盤の沈下が見られる。

７．２　ジオコードプログラムの改善

３．３節で，ジオコード手法の改善について述べたが，図－12に改善前後のInSAR画像を左右に掲載する。図は，Ozawa, et al.（2004）による兵庫県南部地震の余効変動を表すジオコード済みInSAR画像である。改善前（左）に比べ，改善後（右）の画像では，数値地図25000（行政界・海岸線）にもとづく海岸線（白線）に対し，InSAR画像がより忠実になっている。改善後の画像で，１ピクセル分だけInSAR画像の海岸線が海側まではみだしているが，これは海岸線付近のInSAR LOS変動量情報を欠落させないためである。４つのInSAR画像ピクセルデータをバイリニア補間して，LOS変動量を海岸付近で計算できるように設計されている。

改善前（左）の画像では，１～２ピクセル白線からのずれが見られるが，これは，ジオコードアルゴリズムの不正確さに起因しており，改善後に解消した。

改善前の画像では，余効変動が野島断層の南東側に約１ピクセル（約120m）漏れこんでいたが，改善後の画像では，余効変動が野島断層の北西側に限定されており，地震学的に自然な解釈ができるようになった。

図－13は，ジオコードプログラム“geocodbl.c”の改善によるジオコード済みInSAR画像の解像度の改善を示している。改善前には，JERS-1 SARの４×16ルックInSAR画像からピクセルサイズ約60mのジオコード画像を作ると左側画像のように穴だらけになってしまっていた。今回の改善によって，ピクセルサイズ約60mでのジオコードが可能となった。３．３節で示した改善によって，ジオコード済みInSAR画像の解像度が向上し，同時に，位相計測精度すなわち変動量計測精度も向上した。

７．３　GMTの海岸線及び河川・湖沼データ

ジオコードされたInSAR画像に，経緯度目盛，海岸線，河川・湖沼を付加して表示する場合に良く利用されるソフトウェアとして，GMT（Generic Mapping Tools）がある。

ジオコードされたInSAR画像の分解能が高くなり，拡大表示される機会が増えて，日本域のInSAR画像中の海岸線，河川・湖沼の位置が，GMTに対して，微妙にずれていることが気になるようになった。

位置精度が改善されたジオコード画像の場合にも生じる微妙なずれの原因が，InSAR画像とGMTのどちらにあるのか不明だったが，加藤他（2004）が，国土地理院発行の数値地図を基に，GMTの海岸線位置と河川・湖沼位置を調査した。

その結果，GMTの海岸線データは，日本測地系でなく世界測地系に対応し，離島と埋め立て地を除けば，数値地図25000の海岸線と150m以内の精度で一致することが確認された。

GMTに附属の海岸線がいつ頃のものか，千葉県美浜区を例に調査したところ，1974年頃のものだった。GMTの海岸線データは，少なくとも1980年代以降の埋め立て地を反映していない可能性が高い。事実，東京湾や大阪湾など埋め立てが盛んな地域の拡大図では，海岸線の違いがはっきりわかる。

河川・湖沼データに関しては，数値地図と比較して，1000～2000m乖離していることが多く，位置も形状も正しくないことがわかった。

特に大縮尺図を作成する場合には，このような限界がGMTにあることを理解しておく必要がある。

８．考察

本研究においては，JERS-1衛星による古いデータを利用したため，GEONETの密度及び精度が十分でなかったが，2005年に打上げが予定されているALOS衛星では，極めて高精度のInSARデータが得られることが予想されるので，成熟したGEONETから生み出され

る高品質のGPSデータと融合を行えば，多くの新しい知見が得られることが予想される。

当然のことながら，InSAR+GPS融合による三次元変動ベクトル推定が行えるのは，InSAR画像中の干渉が得られている部分だけである。CバンドのInSAR画像の場合，森林や急傾斜地の干渉が得られないことが多いので，InSAR+GPS融合によるメリットが少ない。特に日本では，森林・急傾斜地の割合が高いのに加えて，密度の高いGEONETが整備されているので，融合のメリットを生かすには，やはりLバンドのALOS，さらに，LバンドのALOS後継機が必要とされる。

本研究では，国土地理院が開発してきたソフトウェア“GSISAR”を修正し，干渉解析処理過程に手を加えることにより，InSARデータとGPSデータの高度な融合を実現した。今回の事例で明らかなように，新たな技術開発を行うには，自前で基礎的な研究開発を行うことは重要と考えられる。

第６章において，水準測量と融合結果が良い一致をみたものの，完全に一致しない要因のひとつとして，水準基標の水平位置誤差も挙げられる。水準基標の位置は，TKY2JGDを使って，日本測地系から世界測地系へ変換を行ったので，InSAR+GPSと座標系は整合しているものの，もともとの水平座標値に数10～数100mの誤差があることが原因のひとつと考えられる。従来水準点・水準基標の水平位置は地図から読み取られることが多かったが，GPSデータ及びInSARデータとの比較や，GIS利用を考慮すると，水平位置誤差は，少なくとも10m以下であることが必要とされる。

９．まとめ

InSAR+GPS融合を阻害する要因を分析し，ひとつひとつ除去することを通して，InSAR+GPS融合を実現するプログラム・ツール群，基本データ，融合モデルを開発した。

開発した融合手法を用いて，関東平野北部の地盤沈下地帯について，JERS-1衛星のInSARデータとGPSデータを融合し，高密度な三次元変動場を推定することができた。この内，上下変動場は，水準測量の結果と従来より高い一致を示し，データ融合による確度の向上が確認された。

InSAR画像中の各ピクセルが高精度の経緯度座標値をもつようになり，GIS・GPSと組み合わせて，地震学・水文学の新しい調査研究手法として利用できることを示した。

高精度変位計測が可能なLバンドSARセンサを搭載したALOSと，1200点の高精度GPS連続観測を行っているGEONETを組み合わせる実利用可能なデータ融合手法が構築された。

謝　辞

研究遂行上，ご指導をいただいた海津優氏，及び，100ペアを超える干渉画像の作成等ご支援をいただいた林文氏に感謝いたします。

カーナビとハンディGPSを利用した現地調査に同行された仲井博之氏に感謝いたします。

水準測量のデータを提供いただいた国土交通省関東地方整備局，栃木県，茨城県，群馬県，千葉県，埼玉県に感謝します。

参　考　文　献

藤原　智，飛田幹男（1999）：地殻変動検出のための干渉SAR画像作成技術，日本測地学会誌，第45巻，283-295.

藤原　智，飛田幹男，村上　亮，中川弘之，P. A. Rosen（1999）：干渉SARにおける地殻変動検出精度向上のための基線値推定法と大気－標高補正，日本測地学会誌，第45巻，315-324.

Gudmundsson, S., F. Sigmundsson, and J. M. Carstensen (2002): Three-dimensional surface motion maps estimated from combined interferometric synthetic aperture radar and GPS data, J. Geophys. Res., 107, 2250, doi: 10.1029/2001JB000283.

加藤　敏，飛田幹男，中川弘之，松坂　茂（2003）：Repeat-pass Interferometryを用いた地盤沈下の研究について－GSISARによる関東平野北部地域の試み－，H14年度InSAR技術研究会研究集会.

加藤　敏，飛田幹男，松坂　茂（2004）：GMTの海岸線・河川データの検証，H16年度InSAR技術研究会研究集会.

国土地理院（1995）：都市圏活断層図，国土地理院技術資料，D・1-No.333.

Munekane, H., M. Tobita, and K. Takashima (2004): Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan, GRL, 31, L12608, doi:10.1029/2004GL020158.

中川弘之，村上　亮，藤原　智，飛田幹男（1999）：JERS-1による干渉SARで検出した関東平野北部地域の地盤沈下，日本測地学会誌，第45巻，347-350.

中川弘之（2001）：干渉合成開口レーダの解析技術に関する研究（第１年次），国土地理院調査研究年報，平成13年度，137-140.

Ozawa, T., M. Tobita, H. Yarai, T. Nishimura, M. Murakami, H. Ohkura, Postseismic deformation of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake revealed by JERS-1/InSAR, Abstracts of AOGS 1st Annual Meeting, 57-IWG-A1581, 2004.

島田政信（1999）：SAR干渉処理における軌道誤差と大気位相遅延の補正方法－地殻変動検出への応用－，日本測地学会誌，第45巻，327-346.

飛田幹男・宗包浩志・海津　優・松坂　茂・黒石裕樹・眞﨑良光・加藤　敏（2004）：つくば市周辺の地下水位と地盤の季節変動，測地学会誌，50，27-37.

飛田幹男（2003）：合成開口レーダー干渉法の高度化と地殻変動解析への応用，測地学会誌，49，1-23.

飛田幹男（2002a）：世界測地系と座標変換，（社）日本測量協会，東京，174ページ.

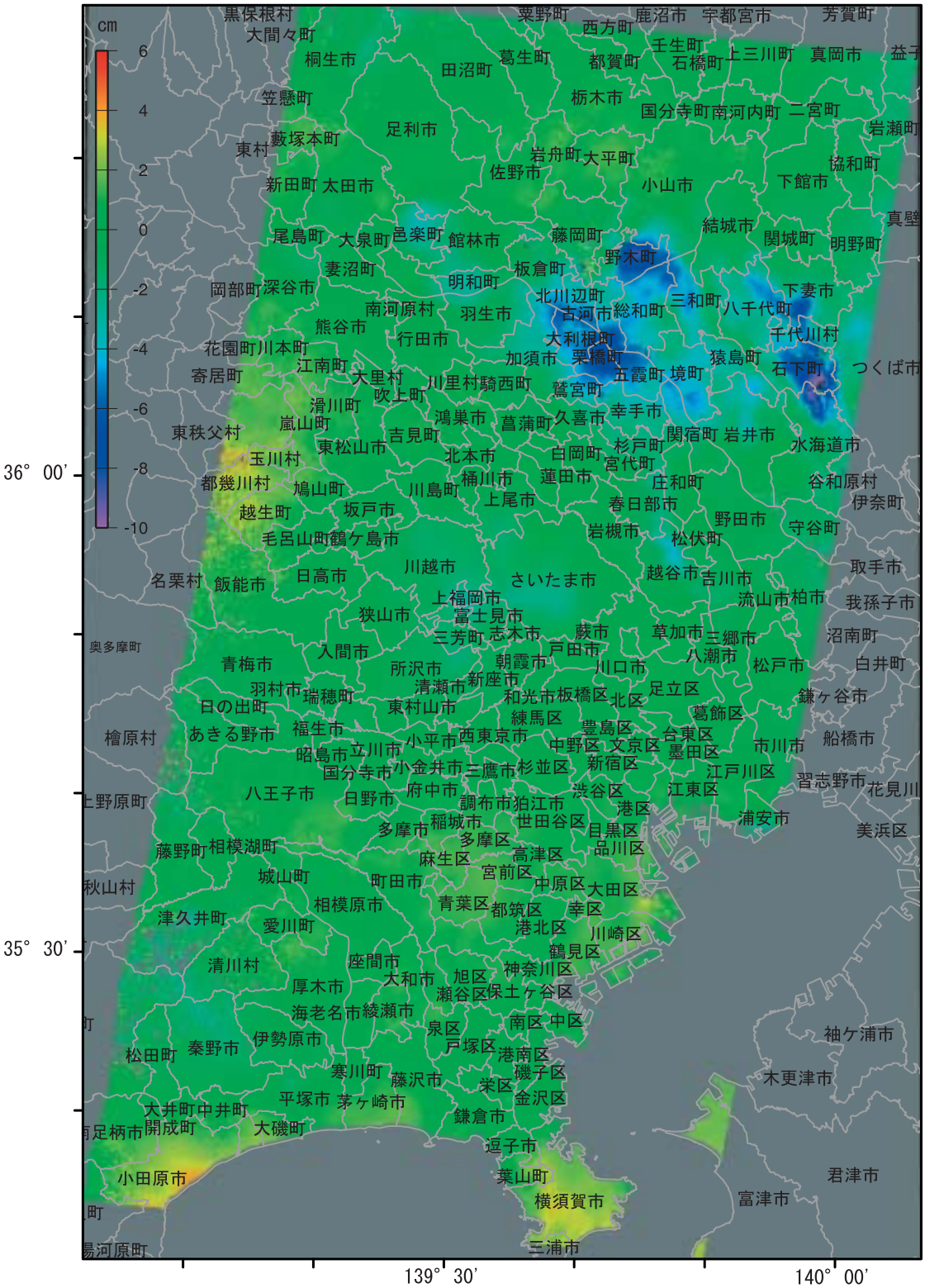
飛田幹男（2002b）：世界測地系移行のための座標変換ソフトウェア“TKY2JGD”，国土地理院時報，No.97，31-52.

飛田幹男（2002c）：日本のディジタル楕円体高データ（DEHM）の作成Ⅱ，地球惑星科学関連学会2002年合同大会講演要旨.

飛田幹男，松坂　茂（2002）：干渉SAR解析自動化へ向けてⅠ，日本測地学会第98回講演会要旨.

飛田幹男，藤原　智，村上　亮，中川弘之，P. A. Rosen（1999）：干渉SARのための高精度画像マッチング，日本測地学会誌，第45巻，297-314.

Tobita, M., S. Fujiwara, S. Ozawa, P. A. Rosen, E. J. Fielding, C. L. Werner, Mas. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, and Mak. Murakami, Deformation of the 1995 North Sakhalin earthquake detected by JERS-1/SAR interferometry, Earth, Planets and Space, Vol.50, No.4, 313-325, 1998.



図－14　**InSAR+GPS**融合による三次元変動場の上成分。1995/1/29～1998/3/18
石下町，水海道市，下妻市，野木町，栗橋町，鷲宮町，幸手市，千代川村，八千代町，五霞町，大利根町，古河市，北川辺町，大利根町，総和町，三和町，加須市，板倉町，関宿町，境町，邑楽町，明和町，越谷市，春日部市，さいたま市，上福岡市，浦安市等で10数センチ～数センチメートルの地盤沈下が見られる。