論説

衛星干渉SAR観測に及ぼす大気中水蒸気の影響評価について

鄭 敏学*・福山 薫*・大村 誠**

Estimation of Atmospheric Water Vapor Effects on Satellite InSAR Observation

Minxue ZHENG*, Kaoru FUKUYAMA* and Makoto OMURA**

Abstract : Atmospheric delay of radio wave propagation is a major source of error for crustal deformation measurements using InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar). Atmospheric delay is caused by topography and horizontal inhomogeneity of water vapor distribution. When accurate weather information is not enough, it is difficult to estimate effects of horizontal water vapor inhomogeneity. This paper discusses the analog weather map method to estimate water vapor effects on the satellite JERS-1 SAR interferometry in the observation period with no accurate weather data. A case study was undertaken of a JERS-1 interferometric pair on Nobi plain. Using GPV-MSM(Grid Point Value of Meso-Scale Model), water vapor distribution in the satellite observation days is recovered, and the atmospheric delay generated by water vapor inhomogeneity was quantitatively evaluated. The results show that the vertical change of differential refractivity between the two observation days does not have a simple linear relationship. Maximum atmospheric delay difference due to horizontal water vapor inhomogeneity is about 38mm in the study area. Spatial distribution pattern of the atmospheric delay estimated by the GPV-MSM data is found to be similar to the phase pattern of differential interferometry.

Key words : satellite InSAR, atmospheric delay, water vapor effects, GPV-MSM, analog weather map method

1. はじめに

干渉SAR(干渉合成開口レーダー)は、マイクロ波を利用し、対象物に直接接触することなく、計測を実施するリモートセンシング技術の一種である。近年、この技術を用いて、多くの地盤変動検出の成果が得られた(例えば、Zebker and Goldstein, 1986; Massonnet *et al.*, 1993; Fujiwara *et al.*, 1998; Shimada and Hirose, 2000)。マイクロ波は大気中を伝播するとき、水蒸気との相互作用により伝播遅延が発生する。

日本では湿度が高く、とくに梅雨時期に水蒸気の変化も激しい。そのため、JERS-1衛星に搭載されたSARの多くのデータは、雨や雲がある気象条件下で取得される。このような場合、得られる干渉SAR画像に水蒸気による大気遅延位相と地殻変動による位相は本質的に分離不可能であり、大気遅延は直接的な誤差を生じさせる(藤原他, 1999; 島田, 1999)。したがって、雨や雲がある気象条件下で取得したデータを有効利用し、地殻変動検出の精度を高めるには、マイクロ波に対する水蒸気の影響についての研究が不可欠

である。

藤原他(1998)は、大気遅延影響の低減のために、複数の異なった時期の観測データの平均化を行っている。これは観測値が多い場合には有効であるが、観測頻度が低く地殻変動が断続的に続く場合は処理しにくい。Delacourt *et al.*(1998)は、地表面の気象データを用いて高度に対する大気遅延の簡易モデルを作成し、エトナ山地域の大気遅延の補正を試みた。大気中の水蒸気の変化は時間的・空間的に均一ではなく、多くの気象観測データがなければ、水蒸気による大気遅延を補正するのは困難である(Williams *et al.*, 1998)。藤原他(1999)は、水蒸気による大気遅延が高度と線形な相関を持つと仮定して、簡単な大気遅延補正の1次モデルを提唱した。実際の大気では、水蒸気の高度変化には1次では表現できない複雑な構造が存在する。島田(1999)は、全球客観解析データ(GANAL)を利用して、大気遅延位相差モデルを提案した。1シーンで同じGANALデータを利用して富士山領域の高度変化による大気遅延の補正に対して有効性が確認されたが、この方法では、水蒸

2010年2月23日受付, 2010年6月25日受理

GEOINFORUM-2006 で一部発表

* 三重大学生物資源学部 Faculty of Bioresources, Mie University, Tsu, Mie 514-8507, Japan. E-mail: zmx503d707@yahoo.co.jp

** 高知女子大学生生活科学部 Department of Environmental Science, Kochi Women's University, Kochi 780-8515, Japan.

気の水平変化による大気遅延は補正できない。大塚・小林 (2002) は、一つのラジオゾンデ観測点での高層気象観測データを用いて大気運動の理論計算に基づき、岩手山地域の風による水蒸気大気遅延を検討した。使用したラジオゾンデ観測地点と研究地域は約 140km 離れている。また、このラジオゾンデデータと SAR データの取得時刻に約一時間半の差があるため、シミュレーションでは、小さいスケールの遅延パターンや山岳波の波長は SAR の遅延と不一致が存在する。

大気中の水蒸気の変化は非常に複雑で、高度変化だけではなく、水平方向にも変化している。詳細な高層気象データがなければ、局所的な水蒸気の影響を補正することは非常に困難である。干渉 SAR に及ぼす大気遅延に関する従来の研究は、主に水蒸気の高高度変化の影響についてのみ検討している。観測期間に詳細な気象データがない JERS-1 などの干渉 SAR に対して、観測日の水蒸気の空間分布や水蒸気の水平変化による大気遅延を定量的に評価することが大きな課題になっている。

本研究では、詳細な気象データがない時期の衛星 JERS-1 干渉 SAR に対して、気象庁が提供している高精度のメソ数値予報モデル GPV-MSM データを用いて、水蒸気分布の影響を評価する方法を検討する。衛星 SAR データ領域にある詳細な高層気象データを用いて衛星観測日の水蒸気分布を復元し、大気の鉛直構造について気象学的な検討を加え、水蒸気分布の違いによる大気遅延量を求め、GPV-MSM データを用いて干渉 SAR に及ぼす水蒸気の影響に関する評価についてその有効性を検証する。

次節では、メソ数値予報モデル GPV-MSM データと研究方法を述べる。それ以降の各節では、解析結果を示し、考察と結論を述べる。

2. 研究方法

2.1 メソ数値予報モデル GPV-MSM データ

気象庁は GPV-MSM データを 2002 年 7 月から毎日 4 回、3 時、9 時、15 時及び 21 時を初期値として 18 時間予報データを配信している。これは地上データ及び高層データに分けている。地上データは水平方向が緯度方向 0.1 度と経度方向 0.125 度の約 10km の格子距離点で、海面気圧、風速の南北・東西成分、気温、相対湿度、降水量、上中下層の雲量のデータ要素からなり、1 時間毎に作成されている。高層の 14 層 (975hPa ~ 100hPa) の各等圧面データは緯度方向 0.2 度と経度方向 0.25 度の約 20km の格子で、3 時間間隔で作成され、そのデータ要素はジオポテンシャル高度、風速の南北・東西成分、気温である。また、相対湿度と鉛直流については 300hPa までの 10 層で与えられている。JERS-1 SAR のデータ取得は日本付近ではほぼ午前 10 時 30 分頃であるので、以下の解析では GPV-MSM データは近接の時刻である 9 時の初期値データを用いる。

2.2 類似天気図法

大気の状態は、地球上の場所によって異なるのは当然であるが、同一の場所でも毎年決して一定ではない。しかし、その変動は毎年ある決った幅のなかにあり、1 年の周期で繰り返すのが普通である。気候とはある場所または地域において基本的にはこの 1 年の周期で、毎年順を追って繰り返される、最も確率の高い大気の総合状態である (福井・吉野, 1979)。類似天気図とは天気予報のひとつの方法として、今日の天気図とよく似たものを過去の天気図から選び出して、その気象変化からその後の予報を行うものである (和田, 1969)。

本研究の類似天気図法はこうした天気予報原理に基づいて、まず JERS-1 データ取得日 (X とする) の天気図とよく似た 2003 年以降のある日 (GPV-MSM データが存在、Y とする) の天気図を捜し出す。この異なる 2 つの日 (X と Y) の天気状態が同じであると仮定して、JERS-1 データが取得された X の日の気象状態を Y の日の GPV-MSM データから復元する。これから大気遅延量を推定し、衛星干渉 SAR に対する水蒸気分布の影響を評価する。

本研究では、1) 2 つの日の地上天気図が類似であるという単純な類似天気図の手法だけでなく、評価の精度を高めるために次のような条件も付加している。2) 2 つの日が同じ季節である。3) 対象地域では地表面観測の気象要素が類似している。4) 対象地域付近の高層気象観測データが類似している。

こうした条件を満たす GPV-MSM データは、JERS-1 データ取得日の気象状態をある程度反映できる。

2.3 可降水量

可降水量とは単位面積あたりの鉛直気柱に含まれる水蒸気量を水量に換算した量であり、式 (1) で求めることができる (二宮, 2006)。単位は kg/m^2 である。

ここに、 g は重力の加速度 (m/s^2)、 q は比湿 (kg/kg)、 ps は地上の気圧 (hPa) である。

$$w_p = \frac{1}{g} \int_0^{ps} q dp \quad (1)$$

2.4 大気遅延量の推定方法

島田 (1999) は、全球客観解析気象データを用いて大気位相遅延量を補正する方法を提案し、大気位相遅延量を次の式 (2) で表している。

$$\phi = -4\pi \frac{2}{\lambda_0 \sin 2\theta_0} \sum_i (n_{m,i} - n_{s,i}) \Delta r_i \quad (2)$$

$$n = 1 + \frac{77.6}{T} P \cdot 10^{-6} + \frac{0.373}{T^2} e \quad (3)$$

ここに、 θ_0 は衛星点におけるオフナディア角、 $n_{m,i}$ 、 $n_{s,i}$ はマスター、スレーブ画像の第 i 大気層の屈折率、 Δr_i は第 i 層の層厚である。また、式 (3) は屈折率 n の経験式であり、

P , T , e はそれぞれ大気圧(hPa), 気温(K), 水蒸気圧(hPa)を表す. 本研究でも, 式(2)に基づいて GPV-MSM データを用いて大気遅延量を推定する.

2.5 大気の屈折指数

大気の屈折率は気圧, 温度, 水蒸気圧の影響を受けるが, 1 に非常に近く, そこで実用的な便宜上, 大気の屈折率 n と 1 の差を屈折指数 N (単位: NU) として, 式(4)で定義する (安達・米山, 1981).

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (4)$$

3. 解析結果

3.1 干渉画像

本研究では, 上に述べた方法による大気遅延量評価として, 濃尾平野を観測した1998年5月6日と同年6月19日の JERS-1 SAR データを用いた. データ処理は, SIGMA-SAR プロセッサ (Shimada, 1999) を利用した. 差分干渉画像 (第1図) は西北部と東南部で位相変化が大きく, 視線距離が伸びていることを示している. 濃尾平野は日本の中央に位置し, 有数の平野である. 養老山地・尾張丘陵・伊勢湾・木曽三川などの多様な地質条件は地域の気候変化に大きな影響を与える. 干渉画像で示される地域は濃尾平野の中心部に位置しており, 西北部の養老山地 (標高約 898m) 以外はほぼ平坦である (第2図). 水蒸気分布の違いによる大気遅延を検討するフィールドとしてきわめて有効な地域の一つである.

3.2 GPV-MSM データの選択

以下では, 1998年5月6日と6月19日の干渉ペアを例として, GPV-MSM データを利用する類似天気図法について検討する.

GPV-MSM データを選択する手順は次の5つの過程からなる. 1) JERS-1 の観測日 (X) の地上天気図の用意. 2) 2003 年以降で類似の天気図 (Y) の抽出. 3) X, Y 両日の名古屋で地表気象データの比較. 4) 観測日 (X) の潮岬でのラジオゾンデ高層気象観測データと 3) で見出した日 (Y) の GPV-MSM データを 925hPa, 850hPa, 800hPa の各等圧面で気象要素の比較. 5) 最類似日を決定し Y の日における GPV-MSM データの取得.

上に述べた手順 1) で得た 1998 年 5 月 6 日と 6 月 19 日の天気図 (第3図, 第4図) に示すように, 1998 年 5 月 6 日の天気は, 日本の南海上に梅雨前線が停滞し, 東海地域は曇りである. 6 月 19 日は, 各地に大雨を降らせた梅雨前線上の低気圧が日本列島を横断して三陸沖の方へ進んだ.

手順 2) では, 2003 年から 2005 年にかけての地上天気図を用いて, 1998 年 5 月 6 日の天気パターンに対する 4, 5, 6 月, 1998 年 6 月 19 日の天気パターンに対する 5, 6, 7 月の類似した天気図を見出す. 見出した類似天気図の日 (Y) の気象データを第1表及び第2表に示す.

第1図 濃尾平野で1998年5月6日と1998年6月19日の JERS-1 SAR 観測結果が計算された差分干渉画像. UTM 座標に読み込んだ.

第2図 差分干渉画像 (第1図) に示した領域の地形図. 等高線の間隔は 100m, 図中の数字の単位は m, 白色は海である.

名古屋の気象観測点は研究地域の東南部に位置する. 手順 3) で 1998 年 5 月 6 日と同年 6 月 19 日の名古屋での地表気象観測データ (気温・海面気圧・水蒸気圧) を, 手順 2) で見出した日の地表気象データと比較すると (第1表, 第2表), 気温・海面気圧・水蒸気圧の地表気象観測データについて, JERS-1 データ取得日 (X) とそれぞれの手順 2) で見出した日 (Y) の気象要素の差は変化が大きい. そのうち, 気温の差が 5℃ より小さい日, 或いは海面気圧の差が 5hPa より小さい日を見出し, 類似の日 (Y) として第3表と第4表で示す.

手順 4) で気象庁が提供するラジオゾンデによる高層観

測データ(高層気象観測年報)を用いて, 1998年5月6日と6月19日と手順3)で見出した日の潮岬での高層観測データを925hPa, 850hPa, 800hPa等圧面で気象要素(ジオポテンシャル高度, 気温, 水蒸気圧)と比較する. 潮岬は研究地域に最も近い高層気象観測点である. 1998年5月6日と2004年5月27日の高層気象データにおける, 各気圧面の気温差は2.1~4.4℃で, 平均値が3.3℃であり, ジオポテンシャル高度の差は平均値が10.6mである. 水蒸気圧の差は3.3~6.6hPaで, 平均値が4.8hPaになる(第3表). したがって, 他の日の気象要素と比べて, 1998年5月6日に対して2004年5月27日の高層気象要素は最も類似している. 同様に, 1998年6月19日に対して2005年7月12日の気象要素が他の日より, 類似性も認められる(第4表). 即ち, 1998年6月19日と2005年7月12日の気温差は0.4~2.1℃で, 平均値が1℃未満であり, ジオポテンシャル高度の差を平均すると2m以下である. 水蒸気圧の差は0.4~2.3hPaで, 平均値は1.3hPaである.

手順5)では, 1)~4)の手順により, 天気図・地表気象データ・高層等圧面気象データを総合的に精査する. 気象

条件が最も類似する日として, 1998年5月6日に対しては2004年5月27日が, 1998年6月19日に対しては2005年7月12日が選択した(第5図と第6図). これらの天気図からわかるように, 2004年5月27と1998年5月6日, 2005年7月12日と1998年6月19日の天気図は類似している.

3.3 水蒸気分布の復元

ここでは, 2004年5月27日と2005年7月12日のGPV-MSMデータを用いて, 1998年5月6日と同年6月19日の水蒸気の分布を復元する.

第7図と第8図の黒線枠内の範囲(以下では研究地域と呼ぶ)は第1図に示した領域と同じである. 各観測日の地上面から300hPa高度まで水蒸気量の鉛直積算(第7図)によると, 2004年5月27日と2005年7月12日の水蒸気分布はかなり異なっている. 研究地域内での2005年7月12日の平均可降水量は, 2004年5月27日の約3倍になっている. 第7図bから第7図aの可降水量を差し引いて, 2つの観測日における可降水量の差を求めた. 研究地域内では可降水量の差の分布は不均一で, 西部から東南部に増加する

第3図 1998年5月6日の天気図.

第4図 1998年6月19日の天気図.

第5図 1998年5月6日の気象条件と最も類似する2004年5月27日の天気図.

第6図 1998年6月19日の気象条件と最も類似する2005年7月12日の天気図.

日付		P	T	E		ΔP	ΔT	ΔE
5/6/1998	(X)	1023.7	20.6	19.2				
4/2/2005		1022.7	9.3	5.4		1.0	11.3	13.8
4/14/2005		1019.2	12.1	4.8		4.5	8.5	14.4
5/17/2005		1020.9	17.8	12.6		2.8	2.8	6.5
5/26/2005		1017.1	19.5	13.2		6.6	1.1	6.0
5/2/2004		1025.9	18.7	15.1		2.2	1.9	4.1
5/27/2004	(Y)	1022.2	23.3	16.9	(Y-X)	1.5	2.7	2.3
4/28/2003		1023.4	18.8	11.1		0.3	1.8	8.1
5/10/2003		1021.7	18.1	11.2		2.0	2.5	8.0
5/11/2003		1024.4	17.7	11.5		0.7	2.9	7.6
5/12/2003		1025.4	18.6	12.2		1.7	2.0	7.0
5/23/2003		1018.7	21.9	16.6		5.0	1.3	2.6

第1表 1998年5月6日の地表面気象観測データ(X)と手順2)で見出した日(Y)の地表面気象データの比較. X: JERS-1の観測日, Y: GPV-MSMの存在する日, Y-X: 観測日と選択した日の各地表面気象要素の差の絶対値, P: 海面気圧(hPa), T: 気温(°C), E: 水蒸気圧(hPa), ΔP : 海面気圧の差(hPa), ΔT : 気温の差(°C), ΔE : 水蒸気圧の差(hPa).

日付		P	T	E		ΔP	ΔT	ΔE
6/19/1998	(X)	1007.4	21.9	25.5				
5/6/2005		1007.4	18.7	18.3		0.0	3.2	7.2
5/18/2005		1014.1	18.8	13.0		6.7	3.1	12.5
6/11/2005		999.8	22.7	23.7		7.6	0.8	1.8
6/22/2005		1002.6	22.8	24.4		4.8	0.9	1.1
7/5/2005		999.2	26.9	24.8		8.2	5.0	0.7
7/10/2005		1006.6	25.2	26.9		0.8	3.3	1.4
7/12/2005	(Y)	1005.6	23.8	26.8	(Y-X)	1.8	1.9	1.3
5/4/2004		1004.9	19.4	21.4		2.5	2.5	4.1
5/16/2004		1008.7	17.7	18.8		1.3	4.2	6.7
5/31/2004		1008.7	28.1	27.8		1.3	6.2	2.3
6/26/2004		1006.2	25.0	26.0		1.2	3.1	0.5
7/1/2003		1007.1	23.7	23.7		0.3	1.8	1.8
7/5/2003		1007.2	23.3	19.5		0.2	1.4	6.0

第2表 1998年6月19日の地表面気象観測データ(X)と手順2)で見出した日(Y)の地表面気象データの比較.

日付		925hPa			850hPa			800hPa		
		A	T	E	A	T	E	A	T	E
5/6/1998	(X)	858	17	18.6	1577	13.5	15	2086	11.1	12.7
4/2/2005		828	8.9	10.5	1522	3.5	6.7	2012	0.8	4.5
5/17/2005		830	10.6	11.3	1531	8.4	4.9	2033	11.1	0.7
5/2/2004		869	14	12.6	1576	9.1	7.3	2076	6.4	4.5
5/27/2004	(Y)	856	14.9	14.2	1566	10.1	8.4	2067	6.7	9.4
4/28/2003		852	12.9	10.9	1556	8.1	6.9	2054	5.1	2.8
5/10/2003		826	11.7	11.1	1529	7.6	9.6	2027	5.2	8.2
5/11/2003		842	11.7	12.7	1545	7	10	2042	4.5	8.4
5/12/2003		858	12.2	12.4	1561	8.4	9.3	2063	7.8	10
		ΔA	ΔT	ΔE	ΔA	ΔT	ΔE	ΔA	ΔT	ΔE
4/2/2005		30	8.1	8.1	55	10	8.3	74	10.3	8.2
5/17/2005		28	6.4	7.4	46	5.1	10.2	53	0	12
5/2/2004		11	3	6	1	4.4	7.7	10	4.7	8.2
5/27/2004	(Y-X)	2	2.1	4.4	11	3.4	6.6	19	4.4	3.3
4/28/2003		6	4.1	7.7	21	5.4	8.1	32	6	9.9
5/10/2003		32	5.3	7.5	48	5.9	5.4	59	5.9	4.5
5/11/2003		16	5.3	6	32	6.5	5	44	6.6	4.3
5/12/2003		0	4.8	6.2	16	5.1	5.8	23	3.3	2.7

第3表 1998年5月6日の高層気象観測データ(X)と手順3)で見出した日(Y)の高層気象観測データの比較. A: ジオポテンシャル高度(m), T: 気温(°C), E: 水蒸気圧(hPa), ΔA : ジオポテンシャル高度の差(m), ΔT : 気温の差(°C), ΔE : 水蒸気圧の差(hPa).

日付		925hPa			850hPa			800hPa		
		A	T	E	A	T	E	A	T	E
6/19/1998	(X)	747	21.1	24.5	1477	17	19.4	1993	13.4	14.9
5/6/2005	(Y)	726	13.2	15.2	1437	11.2	13.3	1943	10.7	12.9
7/10/2005		752	21.5	24.4	1483	18.8	18.5	2003	16.5	14.6
7/12/2005		747	21.5	24.9	1478	17.4	17.1	1996	15.5	16.2
5/4/2004		737	16.7	18.8	1455	13.8	15.8	1965	11.6	12.8
5/16/2004		767	18.5	20	1489	14.9	15.9	2001	12.9	14.6
6/26/2004		745.0	21.1	22.0	1475.0	17.5	17.6	1992.0	14.6	14.3
7/1/2003		734	16.1	16.3	1454	15.3	17.4	1968	13.5	15.5
7/5/2003		750	19.4	21.6	1478	18.5	18.5	1998	15.9	15.5
		Δ A	Δ T	Δ E	Δ A	Δ T	Δ E	Δ A	Δ T	Δ E
5/6/2005	(Y-X)	21	7.9	9.4	40	5.8	6.1	50	2.7	2
7/10/2005		5	0.4	0.2	6	1.8	0.9	10	3.1	0.3
7/12/2005		0	0.4	0.4	1	0.4	2.3	3	2.1	1.3
5/4/2004		10	4.4	5.7	22	3.2	3.6	28	1.8	2.1
5/16/2004		20	2.6	4.5	12	2.1	3.5	8	0.5	0.3
6/26/2004		2.0	0.0	2.5	2.0	0.5	1.8	1.0	1.2	0.6
7/1/2003		13	5	8.2	23	1.7	2	25	0.1	0.6
7/5/2003		3	1.7	2.9	1	1.5	0.8	5	2.5	0.6

第4表 1998年6月19日の高層気象観測データ(X)と手順3)で見出した日(Y)の高層気象観測データの比較.

第7図 各観測日における地上面から300hPa高度までの鉛直積分水蒸気量の分布。(a) 2004年5月27日。(b) 2005年7月12日。黒線枠内の範囲は第1図に示した領域と同じで、図中の数字の単位は kg/m^2 である。

傾向があり、西北部の最小値(39kg/m^2)と東南部の最大値(45kg/m^2)の差が 6kg/m^2 になる(第8図)。

第9図は、(a) 2004年5月27日と(b) 2005年7月12日の北緯34.9度線上における高度925hPaから500hPaまでの比湿の経度—鉛直断面の分布を表す。北緯34.9度は研究地域の中央の緯度に当たる。2005年7月12日の各層の比湿量は2004年5月27日より大きい。両日の比湿量は高度によって減少する傾向がある。水平方向の比湿の変化は両日とも下層で大きく、850hPa以上いずれの日も緩やかである。しかし、2004年5月27日は700hPa面以高でも変化が大きくなる。2004年5月27日はほぼ全層にわたって南風が見られる(第9図a)。一方、2005年7月12日はほぼ全層で西風である(第9図b)。2つの観測時期における比湿の断面分布を第10図に表す。このうち、両日の比湿差は、地表面から925hPa面まで増加し、925hPa面から700hPa

第8図 2005年7月12日と2004年5月27日の可降水量差の分布。黒線枠内の範囲は研究地域である。

第9図 各観測日の北緯34.9度に沿って975hPaから500hPaまでの比湿の鉛直分布図。(a) 2004年5月27日。(b) 2005年7月12日。等比湿線の間隔は1g/kgで、図中の数字の単位はg/kgである。

面にかけて最大になり、700hPa面以高で減少する傾向を示す。500hPa面の値は4g/kgになる。一方、水平方向では、地表面から925hPa面まで減少する傾向があり、地表面では変化が大きく、925hPa面では小さくなる。925hPa面から700hPa面にかけて変化も大きく、700hPa面以高で変化は小さい。東部の比湿は西部より著しく大きくなる。

各観測日の北緯34.9度における高度975hPaから500hPaまでの屈折指数の鉛直断面図を第11図に示した。各観測日の屈折率の鉛直変化は、第9図に示した比湿の鉛直変化のパターンとほぼ同様である。水平方向には下層で変化が見られるが、第9図に示した比湿と比べて変化が小さい。2つの観測時期における屈折率の差の断面分布を第12図に示した。両日の屈折率の差は第10図に示す比湿の差の空間変化パターンと類似している。

3.4 大気遅延量の推定

研究地域で、式(2)に2004年5月27日(1998年5月6日の最類似日)と2005年7月12日(1998年6月19日の最類似日)のGPV-MSMデータを適用して、JERS-1 SAR観測方向の大気遅延量の偏差(平均値より)を求め、大気遅延量の空間分布を再現したのが第13図である。西北部と東南部に大きな変化が存在し、両日の大気遅延量の最大偏差は約38mmになる。国土地理院発行の50メッシュの数値標高モデル(DEM)データとGPV-MSMデータを用いて、

第10図 北緯34.9度に沿って2005年7月12日と2004年5月27日の比湿差の鉛直分布図。

第11図 各観測日の北緯34.9度に沿って975hPaから500hPaまでの屈折指数の鉛直分布図。(a)2004年5月27日。(b)2005年7月12日。図中の数字の単位はNUである。

SAR観測方向の地形標高による大気遅延量を求め、第14図に示した。地形標高による大気遅延量は研究地域の西北部にのみ分布する。

4. 考察

4.1 干渉SARの大気遅延

濃尾平野での水準測量成果(東海三県地盤沈下調査会)によれば、干渉ペアの取得期内に顕著な地殻変動は観測されていない。各JERS-1 SAR観測日の天気は、1998年5月6日は曇りで、6月19日は雨である。両日の水蒸気分布は均一ではなく、第1図の差分干渉位相に水蒸気分布による大気遅延が大きな影響を与えている可能性がある。

4.2 類似天気図法

手順2)で類似の天気図を見出すには、主に等圧線の空間分布と梅雨前線の位置を比較する。大気中に含まれている水蒸気量は、温度によって限界があり、最大量が決まる。手順3)と手順4)では気象要素を比較する際に、各気象要素のうち気温が最も重要である。手順3)で、地表観測データを比較するとき、JERS-1データ取得日とそれぞれの手順2)で見出した日の気温・海面気圧・水蒸気圧の差は変化が大きく(第1表、第2表)、GPV-MSMデータの類似する日を見出しにくい。気温差5℃、海面気圧差5hPaを閾値に設定する。この閾値は経験値である。手順4)で高層観測

第12図 北緯34.9度に沿って2005年7月12日と2004年5月27日の屈折指数差の鉛直分布図。

第13図 大気遅延量の水平分布の偏差図。図中の数字の単位はmm, 等値線の間隔は10mm, 白色は海である。

第14図 地形標高による大気遅延図。図中の数字の単位はmm, 等値線の間隔は10mm, 白色は海である。

データを比較すると, 1998年5月6日に対して, 2004年5月27日の各気象要素が類似し, 2004年5月2日も類似している(第3表)。同様に1998年6月19日に対して, 2005年7月12日と2004年6月26日の気象状態も類似する(第4表)。最も類似する日を選択するため, 四日市の地表面気象観測データと浜松のラジオゾンデの高層観測データを参考にした。手順5)で最類似日を決定するときに, 風向・風速データを参考にした。

一方, 衛星 SAR データと GPV-MSM データの取得時刻は決まっているため, 同じ日に同じ場所で取得すれば, 取得時間の差も約一時間半が存在している。この取得時間の差は, GPV-MSM データだけではなくラジオゾンデのデータ・GANAL のデータでも存在している。以前の研究には, その時間差によって気象条件が変化せず, 異なった時刻の大気物理量が類似すると仮定した(島田, 1999; 大塚・小林, 2002)。したがって, 詳細な高層気象観測データを用いて SAR 電波の大気遅延の影響を評価するのに, 類似法は一つの重要な方法といえよう。本研究では, 大気の屈折率を定める気圧, 温度, 水蒸気圧などの気象要素を重要なパラメーターとして, JERS-1 の観測日の気象要素と最も類似している GPV-MSM データの日を見出した。そのため, 選択した GPV-MSM データと JERS-1 SAR データの取得時間の差は約5年間であるが, GPV-MSM データは, JERS-1 データ取得日の気象条件を反映し得る。類似天気図法の精度を高めるには今後の研究がさらに必要である。

4.3 水蒸気の影響評価

GPV-MSM 水蒸気データから両観測日の地上面から300hPa 高度までの可降水量の分布を定量的に再現した(第7図, 第8図)。2004年5月27日の水蒸気分布は東南から

北部に増加している。2005年7月12日の水蒸気分布は西北部から東南部に増加する傾向がある。2つの観測時期における可降水量の差は空間的に非常に不均一で, 2005年7月12日の空間分布のパターンと類似する。水蒸気量が多い2005年7月12日は, 水蒸気分布による大気遅延に大きな影響を与えていると推定される。可降水量1.5mmは大気遅延量1cmに値する(藤原他, 1998)。第8図の研究地域での可降水量分布の最大差は 6kg/m^2 (6mm)になる。即ち, 水蒸気水平分布の違いによって約40mmの大気遅延量をもたらしている可能性がある。

観測日における各気圧面での比湿と屈折指数の分布は, ほぼ一致しており, 高度変化があり, 局所的な水平方向の変化も著しく発生している(第9図と第11図)。比湿と屈折指数における鉛直構造の二日間の差における高度変化は簡単な線形関係ではなく, 非常に複雑な変化を示している(第10図と第12図)。各観測日の比湿と屈折指数は高度によって減少する傾向があり(第9図と第11図), 両日の差は, 高層では決して小さいとは言えない。600hPa面では, 両日の比湿差は約 6g/kg で, 屈折指数差が約25NUになると, 地表面での値はほぼ同じになる。両日の比湿差と屈折指数差は500hPa面の値も小さくなく, 無視できない。これは2005年7月12日における比湿と屈折率の高度による減少率が, 2004年5月27日と一致しないためである。本研究では, 900hPa 以上の大気の鉛直変化は考慮しないが, 標高が高い山地を対象とする大気遅延の研究にとっては, これらの結果は重要であろう。一方, 水平方向では, 比湿と屈折指数における鉛直構造の二日間の差は, 地表面から700hPa 面にかけて変化が大きいことが示される(第10図と第12図)。GPV-MSM のデータの解析から, 両日の水蒸気の水平分布に主な影響を与えているのは, 700hPa 高度以

下の大気中水蒸気で、両日の水蒸気量の分布は空間的に非常に不均一である。したがって、水蒸気の水平分布変化だけではなく、本研究地域では西北部の小さい山地の標高による大気遅延も差分干渉位相に大きな影響を与える。

研究地域で1シーンを通しての水蒸気水平分布による大気遅延の最大偏差は約38mmであり、東南で著しく大きいことが示され(第13図)、可降水量の差の空間分布パターン(第8図)とよく類似している。研究地域の西北で地形標高による大気遅延量も発生し、海拔0mを位相基準面としたとき、海拔898mの山地で推定した大気遅延は約53mmである(第14図)。したがって、第1図の西北部での位相変化は、標高変化による大気遅延、東南部は水蒸気の水平変化に伴う大気遅延によって生じていることが考えられる。

GPV-MSM データを用いて、観測日の水蒸気の空間分布を分析し、水蒸気による大気遅延を定量的に評価できることを示してきた。しかし、GPV-MSM 水蒸気データから推定した大気遅延と差分干渉位相の空間分布パターンは類似しているが、局所的に変化の範囲位置に少しずれが見られる。この原因は、JERS-1の観測日と見出した日のGPV-MSM データの気象要素が近似しているが、ある程度誤差が存在しているためである。さらに、GPV-MSM データの精度はJERS-1 SAR データと比べて解像度が粗いためと考えられる。気象庁は、2006年3月から地表面は水平格子間隔約5kmメッシュで、高層各等圧面は約10kmメッシュでGPV-MSM データを提供している。今後、もっと詳細なGPV-MSM データを用いれば、水蒸気分布の影響の評価精度を高めることができるであろう。

5. 結論

詳細な気象データがない時期の衛星干渉SARの観測データに対して、GPV-MSM データを用いて水蒸気分布の影響を評価する方法について検討した。高精度GPV-MSMの水蒸気分布を用いれば、マイクロ波の大気遅延の影響を評価できる。また、類似天気図法は、高精度の高層気象データの存在しない衛星JERS-1干渉SARの大気遅延の評価に有効に利用できる。GPV-MSM データのある2003年以後の干渉SARに対しても、本研究の成果を生かすことができる。本研究は観測日の大気の鉛直構造を定量的に検討し、大気遅延パターンを気象学的に考察し、水蒸気による大気遅延を定量的に評価した。GPV-MSMの水蒸気データから推定した大気遅延量の分布は、空間的に非常に不均一で、研究対象地域のJERS-1 SARの1シーンで大気遅延量水平分布の最大差は約38mmとなることが示された。即ち、干渉SARによる地殻変動の検出精度を高めるために、水蒸気水平分布の違いによる大気遅延を補正することが重要である。

謝辞：合成開口レーダーのデータ解析には宇宙航空研究機構地球観測利用推進センターの島田政信により開発されたSIGMA-SAR processorを使用させていただきました。また、投稿原稿に対して査読者から有益なご意見いただき、

これらは論文の改善に大いに役立った。ここに記してお礼申し上げます。

文 献

- 安達三郎・米山務(1981) 電波伝送工学, 株式会社コロナ社, pp.229.
- Delacourt, C., Briole, P. and Achache, J. (1998) Tropospheric correction of SAR interferograms with strong topography: Application to Etna. *Geophys. Res. Lett.*, vol.25, pp.2849-2852.
- Fujiwara, S., Rosen, P.A., Tobita, M. and Murakami, M. (1998) Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS-1 synthetic aperture radar interferometry near Izu Peninsula, Japan. *J. Geophys. Res.*, vol.103, pp.2411-2426.
- 藤原智・飛田幹男・村上亮(1998) 干渉SARによる水蒸気情報の重要性, 気象研究ノートGPS気象学(内藤勲夫編), 192号, pp.199-212.
- 藤原智・飛田幹男・村上亮・中川弘之・P. A. Rosen(1999) 干渉SARによる地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気一標高補正. 測地学会誌, vol.45, no.4, pp.315-325
- 福井英一郎・吉野正敏(1979) 気候環境学概論. 東京大学出版会, pp.1-19.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993) The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, vol.364, pp.138-142.
- 二宮洸三(2006) 気象がわかる数式入門. 株式会社オーム社, pp.75
- 大塚彰・小林茂樹(2002) 干渉SARの風による遅延パターンと気象数値実験. 写真測量とリモートセンシング, vol.41, no.4, pp.85-98.
- 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 —. 測地学会誌, vol.45, no.4, pp.327-346
- Shimada, M. and Hirose, H. (2000) Slope corrections to normalized RCS using SAR interferometry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, vol.38, no.3, pp.1479-1484.
- Shimada, M. (1999) Verification processor for SAR calibration and interferometry. *Advances in Space Research*, vol.23, no.8, pp. 1477-1486.
- Williams, S., Bock, Y. and Fang, P. (1998) Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *J. Geophys. Res.*, vol.103, pp.27051-27067.
- 和田英夫(1969) 長期予報新講, 地人書館, pp.125-129.
- Zebker, H. A. and Goldstein, R. M. (1986) Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observation. *J. Geophys. Res.*, vol.91, pp.4993-4999.

要 旨

衛星干渉 SAR 観測に及ぼす大気中水蒸気の影響評価について

：鄭 敏学・福山 薫・大村 誠

干渉 SAR による地殻変動観測の主要な誤差要因の一つに電波の大気遅延がある。大気遅延は、標高や水蒸気水平分布の違いによって発生する。詳細な気象データがなければ、水蒸気水平分布の影響を評価することは非常に困難になる。ここでは詳細な気象データがない時期の衛星 JERS-1 干渉 SAR に対して、水蒸気分布の影響を評価する類似天気図法を検討する。濃尾平野での JERS-1 干渉ペアを例として、メソ数値予報モデル GPV-MSM データを用いて衛星観測日の水蒸気分布を復元し、水蒸気分布の違いによる大気遅延を定量的に評価する。二つの観測日における屈折指数差の鉛直変化は簡単な線形関係ではないことを示している。研究対象地域における大気遅延量水平分布の最大差は約 38mm となる。GPV-MSM 水蒸気データから推定した大気遅延量と差分干渉位相の空間分布パターンは類似している。

キーワード：衛星干渉合成開口レーダー、大気遅延、水蒸気の影響、メソ数値予報モデルデータ、類似天気図法