衛星監視に基づくメグナ川河口周辺地形の大規模変形特性の解明

Monitoring and Investigation of Dynamic Morphological Change in Meghna Estuary

田口裕介¹・田島芳満²・Mohammad Asad Hussain³

Yusuke TAGUCHI, Yoshimitsu TAJIMA and Mohammad Asad HUSSAIN

Meghna Estuary is located in the south of Bangladesh and is one of the most dynamically deforming estuaries on the earth. The Ganges, the Brahmaputra, and the Meghna merge with each other and find their way to Meghna Estuary and discharge with huge amount of sediment. The recent coastlines were distinguished by a total of twenty-one PALSAR images from 2007 to 2011. Observed change of the land area was compared with various factors and it was found from the analysis that the morphological change in Meghna Estuary showed seasonal cyclic trend and is strongly related to heavy sediment discharge from the Meghna River and near shore waves. It should also be highlighted that precipitations in the catchment and the observed area change showed strong correlations but has clear phase shift of around 100 days.

1. はじめに

バングラデシュ・デルタ地帯は、河川からの大量の土砂供給や潮流、波浪等の影響により、絶えず変形している。このような大規模な地形変動特性の理解は、沿岸域の安定した利用・整備計画を立てるためにも極めて重要である。一方、特に途上国においては沿岸域の地形変化を引き起こす波浪や潮汐、河川からの土砂供給などの定量的な情報の蓄積は少なく、また特にバングラデシュのような広大な領域における大規模な地形変化特性の把握は困難を極める。

本研究では、衛星データに基づき沿岸部の大規模な地形変化を把握し、海浜地形変化を引き起こすと考えられる影響因子との比較を通じてその特性分析を行う手法の構築を試みる。さらに、構築した手法をバングラデシュ南海岸のメグナ川河口域周辺(図-1)に適用し、その妥当性を検証するとともに、当該地点における海浜変形メカニズムの解明を試みる。

本研究で対象とするメグナ川河口域は、ベンガル湾の湾奥に位置し、潮流や潮位変動が大きく、暴浪時には南方からの厳しい波浪に晒される。また河口部を形成するメグナ川は、ガンジス川とブラマプトラ川が流れ込む広大な集水域を持ち、大量の土砂を供給している。これらの影響因子の下、当該地点ではダイナミックで広大な海浜地形変化が絶えずおきている(Koen, 2011)。また、乾期とモンスーン期では、これらの影響因子の特性が大きく異なるため、当該地点における海浜変形メカニズムを正しく把握するためには、季節的な変動を含めた分析が必要不可欠になると考えられる。

2. 衛星画像に基づく地形変化の分析

田島ら(2011)の手法に基づき、2007年1月～2011年4月に撮られた21枚のALOS PALSAR画像の解析を行った。PALSAR画像はマイクロ波センサを用いており、高解像度(分解能10m)で雲や夜間の影響を受けずに観測できる。田島ら(2011)によれば、スリランカ西海岸では、砕波帯内における砕波の乱れにより、PALSARに記録される砕波帯からの反射強度は砂浜からのそれよりも大きく、結果として、陸域を縁取りする反射強度の極めて低い領域の外縁位置が、GPSにより計測した汀線位置と良く一致した。一方、本研究の対象地点では干潮時に水面上に現れる陸域や浅瀬では、波浪が小さく反射強度が極めて小さく、砕波帯との境界の判別が困難であった。しかしながら、現地調査時(2012年12月7日)に撮影した海岸線(写真-1)に示すように、海岸線は崖状の地形を有し、かつ海岸線間際まで植生が繁茂していることが

図-1 メグナ川河口域 (Google Earth より)

1 学生会員
2 正会員 Ph.D
3 Ph.D.

東京大学大学院工学系研究科
東京大学大学院工学系研究科教授
東京大学大学院工学系研究科特任研究員

確認されたため、本研究では海岸線近傍で比較的強い反射強度が陸域を縁取っている境界を汀線位置として抽出した。PALSAR画像の例を図-2に示す。本研究で海岸線位置を抽出したUrir-Charは直径約10kmの島であり、その対岸の陸域がNoakhaliである。なお、本地点ではPALSAR画像取得時の汀線位置情報が存在せず、汀線位置の推定誤差の分析はできないが、PALSAR画像に基づく座標推定誤差は10m程度であり（田島ら, 2011）、汀線位置の時間変化の比較には十分な精度を有していると考えられる。

図-3に、2007年から2010年の3月に記録したPALSAR画像から抽出したNoakhaliとUrir-Charにおける汀線位置を比較する。ただしNoakhaliについては、図-2の白枠で囲まれた部分が浅く、海岸線の判別が困難であったため、汀線抽出範囲を図-2に青枠で示した領域に限定した。図より海岸線位置は3年間で大きく変動しており、特にNoakhaliにおいては汀線が徐々に陸側に移動する侵食傾

向が、Urir-Charの南東側では顕著な汀線の後退が、それ以外の地域では大きな前進傾向が見られた。

写真-1において、(a)～(d)の記号は図-2の記号に対応し、撮影した位置を表している。画像(a)はUrir-Charの南部の港で撮影したもので、急勾配の海岸線になっていることがわかる。一方、画像(b)はこの地域で海岸が崩落している様子で、崩落した土塊にも植生が繁茂していたことから、画像撮影日の直前に崩壊したものであると考えられ、現地で得た証言と合わせて図-3で見られたUrir-Charの南部～東部での侵食傾向と確かに合致した。画像(c)はUrir-Charの北西部に広がっている干潟を海上から撮影したものである。この周辺は非常に遠浅な地形で、干潮時には海底が干出する。このような堆積傾向の浅瀬がUrir-Charの南東部を除く地域には広がっているが、図-3に示した汀線位置は、浅瀬の陸側に確認できた急勾配の浜崖の位置を抽出している。画像(d)はNoakhaliの海岸線を撮影したもので、画像(c)の対岸の部分にあたる。急勾配で侵食性の海岸になっており、周囲では崩落の痕跡が多数確認できた。

次に、抽出した汀線位置からUrir-CharとNoakhaliの陸域面積をそれぞれ計算し、2007年1月における陸域面積からの面積変化量の時間変化を図-4に示した。図より、Urir-Charの島全体の面積は年間約3.4km²ほど増加する堆積傾向にあり、一方で、Noakhaliの面積は年間約1.6km²の侵食傾向であることが分った。

3. 地形変化影響因子の推定

衛星画像により捉えられた汀線位置は、海岸侵食や堆積に伴う地形変化に加え、画像取得時における潮位の影

写真-1 対象地点沿岸部の状況

図-2 PALSAR画像の例とNoakhali, Urir-Charの位置関係

図-3 抽出した汀線位置の比較

図-4 Urir-CharとNoakhaliの面積変化

響も受ける。対象地点のメグナ川河口域では浅瀬が多く潮位差が大きいので、干満に伴う汀線位置の変化は、抽出すべき地形変化に伴う汀線位置の変化に比べても無視できないほど有意であることが推察される。

このため本研究では、衛星データにより抽出した汀線位置の変化は、実際の侵食・堆積に伴う汀線変化と潮位に伴う「見かけの」汀線変化の組み合わせにより表わされ则认为、抽出した汀線変化を説明する因子には、波浪場やメグナ川からの土砂供給量などの地形変化を引き起こす直接的な因子に加え、データ取得時の潮位も加えることとした。しかしながら、これらのデータの多くは実測データが存在しないため、本研究では以下に整理する手法に基づき推定した。

(1) 潮位の推定

メグナ川河口域では、限られた期間、地点による潮位データしか得られていないため、PALSAR画像が撮られた各時点でのメグナ川河口域周辺の潮位を推定する必要がある。本研究ではまず、全球スケールでの潮位推定モデルとして、松本(2004)のグローバル海洋潮汐モデル(NAO.99b)を用いて推定を試みた。

図-5に示した地点A, B, Cでは観測された潮位(赤点)とグローバル海洋潮汐モデルによる予測値(黒実線)を図-6に示す。ここで潮位の実測値は1996年12月～1997年2月に湾内の5地点で2時間おきに観測されたデータが記録されており(BWDB, 2011)、このうちUrir-Charに近い図-5に示した地点A～Cの3地点を比較対象とした。図に見られるように予測値と実測値には明らかに乖離があり、本研究における衛星画像取得時の潮位の推定に適用するための十分な精度が得られていない。そこで本研究では、グローバル海洋潮汐モデルでは考慮されていない地形の影響を反映させるため、ベンガル湾沖での潮位変動をNAO.99bを用いて推定し、それを境界条件として与えた潮位変動解析を実施することによって、メグナ川河口域における潮位推定を試みた。

ここで対象地点における潮汐応答解析には、コリオリ力と底面摩擦抵抗項を加えた球面座標系に基づく非線形長波方程式を用いた。また海底地形データには、General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO, 例えばWard, 2010)を用いた。図-5に示した水深はGEBCOのデータをそのまま示している。図に見られるようにUrir-Char周辺の湾奥では水深が異常に大きくなっており、また地形が激しく変形するメグナ川河口域では、海岸線の位置についても衛星画像取得時における状況を正しく再現できていない。これらの地形条件は潮位の推定精度に影響を及ぼすことが推察されたため、本研究では衛星画像に基づき海岸線位置の修正を試みた。

潮汐データの得られている1997年の汀線位置の抽出に

は、JERS-1による衛星写真(1997年5月9日)を用い、水深は2012年に実施した現地観測の際にGPSソナーで計測したデータを参考にして修正した。次に修正した水深に対して潮汐応答計算を実施し、観測値と比較した。湾奥部の水深分布は、計算された潮位変動の振幅や位相に影響を及ぼすと考えられ、本研究では、潮位の予測値と観測値がより良く整合するように、試行錯誤により湾奥部のみを対象に水深データの修正を試みた。その結果、図-6で示したように、赤点で表されている観測値と青線で表した計算結果とがほぼ一致する水深データを得た。ここで得た水深データは、現地観測時に計測したデータとも整合していることを確認した。

次に、作成した1997年の地形データに基づき、2012年の地形データを作成した。海岸線位置には対象時期に最も近い2011年4月のPALSAR画像を用い、海岸線位置が衛星データと一致するように水深データを補正した。作成した地形データを図-7に示す。この地形データを計算領域(格子間隔10秒)として推定した潮位と2012年の現地観測時に計測した潮位データを比較した。調査地点は図-7に示した地点D, Eの2地点である。潮位の予測計算結果と観測結果との比較を図-8に示す。図より、振幅がやや過小評価されている部分はあるものの、地点D, Eにおいて計算結果と観測値が概ね一致していることが確認できた。以上より、ここで用いた手法に基づきPALSAR画像の取得時における潮位の推定を行うこととした。

図-5 GEBCOから取得した水深データと地点A～Cの位置

図-6 地点A～Cにおける潮位の観測値(赤丸)、グローバル潮汐モデルによる予測値(黒実線)および、非線形長波モデルによる予測値(青実線)

図-7 作成した2012年の地形データと地点D, Eの位置

図-8 地点D,Eにおける観測値(青)と予測値(赤)の比較

(2) 波浪場の推定

メグナ川河口域周辺における波浪場の観測データは存在しないため、潮位と同様に推定する必要がある。本研究では、衛星画像から抽出した陸域面積の季節変動を説明する影響因子の一つとして波浪条件を用いることを想定しており、時々刻々の詳細な波浪条件の推定精度よりも、波浪条件の相対的な季節変動が推定できれば良い。そこで本研究では、バングラデシュ気象局によるベンガル湾南西部における1日あたりの平均風速、風向データ(Hussainら, 2010)に基づき、SMB法を用いて有義波波高を概算した(図-9)。風向は吹送距離の概算に用いた。波向も地形変化特性に影響を及ぼすと考えられるが、メグナ川河口域はベンガル湾奥に位置しており、卓越波向は限定されるため、本研究では考慮しなかった。

(3) 流砂量および降雨量

メグナ川から供給される土砂は、河口域の地形変化特性を説明する際の最も重要な因子のひとつであると考えられるが、その土砂量の季節変動を精度よく推定するのは困難である。また波浪場の推定と同様に、本研究では陸域面積の季節変動の説明因子の一つとして土砂供給量を用いることを想定しており、年間を通した相対的な季節変動が妥当に得られることが望ましい。

そこで本研究では、メグナ川からの流量は供給土砂量と強い相関があると仮定し、流域の降雨データを説明因子として用いることとした。降雨データには米国海洋大

図-9 波浪推算による有義波波高

図-10 集水域全体の月平均降水量

気圏局によるCPC Merged Analysis of Precipitation (CMAP)を用い、メグナ川に流れ込むガンジス川、ブラマプトラ川の集水域を含む北緯22.5～27.5度、東経82.5～95度の領域を対象に、月平均降水量を用いた(図-10)。

4. 陸域面積の変化と影響因子との関係

メグナ川河口域の地形変化を説明する影響因子として、衛星画像取得時の潮位、観察期間中の波浪場(有義波高)、河口からの土砂供給量と強い相関があると考えられる流域面積の月別降雨量を推定し、衛星画像から抽出したUrir-CharおよびNoakhaliにおける陸域の総面積と合わせて図-11に整理した。ここでは図に示した諸量に基づき、陸域面積の変化を再現する推定式を構築し、得られた推定式に基づき当該地点における地形変化特性を検証する。本研究で用いた推定式を以下に示す。

$$A(t) = a_0 + a_1 \eta(t) + a_2 \int_0^t Q(t' - \phi) dt' + a_3 \int_0^t H(t') dt' + a_4 \int_0^t H^2(t') dt' \dots \dots \dots (1)$$

ここで $A(t)$ は図-11に示したUrir-CharとNoakhaliの総陸域面積、 t は時間、 $\eta(t)$ は潮位、 $Q(t)$ は降水量、 $H(t)$ は有義波高である。 $a_0 \sim a_4$ は係数であり、データに基づき最適値を推定する。また降水量については、実際には降水が河川を流下し河口に到達するまでには時間を要することを勘案し、時間差 ϕ を式中加入した。海岸斜面は一定勾配で近似できると仮定し、潮位による面積変化は式(1)に示したように一次式で表現した。また第3項から第5項までは、河川からの土砂供給量および波浪に伴う地形変化を表現しているが、式(1)は変化量ではなく、

図-11 陸域面積と各影響因子の経時変化

図-12 降水から堆積までの時間差 (日) と面積推定誤差

時々刻々の面積を表わしているため、これらの項についてもそれぞれの因子に伴う地形変化量の推定式を、観測開始時から対象時刻 t まで時間積分して与えた。また第4項、第5項では波浪に伴う地形変化量を波高の2次式で表し、例えば低波浪時には堆積傾向、高波浪時には侵食傾向となるような波高によって傾向の異なる現象の再現を試みた。

以上の推定式に対して、時間差 ϕ は段階的に変化させながら固定値として式(1)に代入し、それぞれの推定式に対して最小二乗法に基づき係数 $a_0 \sim a_4$ を推定した。図-12には異なる ϕ を与えた場合における面積推定値の二乗平均誤差を示し、図-13にはその最適値であった $\phi=110$ 日を与えたときの推定式による計算結果と実際の面積変化とを比較した。ここで図-13の2段目の図は、衛星データに基づく陸域面積の実測値およびその推定値の両者に対し、潮位による寄与分のみを取り除いた後の「実際の地形変化」に伴う面積変化量を比較している。以上の図より、面積推定値の誤差は時間差 ϕ が80日から120日の時に極小となっており、流域における降水量のピークとメグナ川河口域における堆砂のピークには3ヶ月以上の時間差があることを示唆している。図-13において、陸域面積の季節変動が捉えられている2007年からの3年間に着目すると、3月～7月のモンスーン期に侵食傾向、9～1月の乾期に堆積傾向があることが確認でき、現地で得た証言と符合する結果が得られた。また波浪場による地形変化量への寄与分については、第4項および第5項ともに侵食傾

図-13 面積変化の実測値と予測値、波浪と降雨による地形変化量推定値の経時変化

向が示された。今後さらにデータを蓄積することにより、より詳細な特性が把握・検証できるものと考えられる。

5. 結論

観測データの乏しいバングラデシュ南部メグナ川河口域において、衛星データに基づき陸域面積変化を、その他のデータやモデルを用いて地形変化の説明因子を推定し、両者の関係を表わす推定式を構築した。本研究で構築した手法を用い、潮位に伴う汀線位置の変化による影響を取り除くことにより、モンスーン期には侵食傾向、乾期には堆積傾向を示すことや、流域の降水量のピークと対象地域の汀線前進のピークには100日前後の時間差があることなどが明らかとなった。

本研究はAPRSAF (アジア太平洋宇宙機関会議) の枠組みの下で実施したものである。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 田島芳満・望月翔平・舟竹 祥太郎・W. Bandula・S. Lal・祖父江真一・佐藤慎司 (2011) : 衛星データおよび砂粒子の熱ルミネッセンスの分析に基づくスリランカ西海岸における沿岸漂砂環境の解明, 土木学会論文集B2 (海岸工学), vol.67, No.2, pp.I_631-I_635.
- 松本晃治 (2004) : 海洋潮汐モデルNAO.99bの構築と普及, 測地学会誌, 第50巻, 第3号, pp.187-200.
- Bangladesh Water Development Board (BWDB) (2001) : Hydro-morphological dynamics of the Meghna estuary, Meghna Estuary Survey-II.
- Hussain, M. A., M. A. Hossain and A., Haque. (2010) : Numerical Investigation of Residual Currents in the Meghna Estuary, Final Report, CASR, BUET, pp. 25-27.
- Koen de Wilde (2011) : Moving Coastlines: Emergence and Use of Land in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Estuary, University Press Limited, Dhaka., pp. 21-37.
- Ward, R. (2010) : General Bathymetric Chart of the Oceans, Hydro International, Vol.14, No. 5. (on-line)