

人工衛星画像を用いた津波の発生および伝播観測に関する検討

鈴木由美*・児島正一郎**・高橋智幸***・高橋心平****

本研究では、衛星リモートセンシングによる津波観測の可能性を明らかにするために、津波が観測されている可能性がある衛星画像 (LANDSAT-TM 画像, LANDSAT-MSS 画像, ERS1-SAR 画像) の検索を行った。検索は海底地震発生直後の震源地周辺の海面を対象に実施し、津波が観測されている可能性が高い衛星画像に対しては、スペクトル解析によってその定量的な解析を行った。最後に、衛星リモートセンシングによるインド洋大津波の観測の可能性と今後の課題についての議論を行った。

1. はじめに

日本是世界でも地震が頻発する国の一つである。それに加え、国土の四方を海に囲まれた島国であるために、日本近海を震源とする地震が発生した場合、常に津波の危険と隣り合わせとなる。このため、沿岸に接近する津波を検知するための津波観測システムや数値シミュレーションによる津波予報システムの開発が進められ、実用化されている。

例えば、津波観測システムとしては、光ケーブルを利用した津波観測システムや GPS 津波観測システムなどが開発され、実用利用のための検討がなされてきた (例えば、石田ら (1998) や永井ら (2003))。これらの津波観測システムは沿岸から数十 km の沖合に設置され、これまでに沿岸に接近する津波の観測に成功している。しかしながら、これらの津波観測システムは、ある 1 地点における津波を正確に観測することを目的に開発されたため、面的に津波を観測することはできない。また、これらの観測システムによって、外洋 (沿岸から 100 km 以上沖合) を伝播する津波の観測は現時点で不可能である。

一方、津波予報システムとしては、気象庁が開発した津波予報システムがある。この津波予報システムは、地震発生から 2 分以内に沿岸域に到達する津波の予報が可能である。しかしながら、地域ごとのテクトニクスにおける相違 (アスペリティに起因する津波波源の不均一性) を初期条件に反映させていないために、高精度の津波予報を提供するには至っていない。また、スマトラ島沖地震のような超巨大地震や津波地震で発生した津波に対しては、過小評価する危険性もある。

これらの問題 (津波観測システムにおける面的観測の

問題と津波予報システムにおける津波の初期条件の問題) を解決するためには、広域の津波観測が可能な新たな津波観測システムを構築する必要がある。この新たな津波観測システムを構築するための第一段階として、本研究では衛星リモートセンシングによる面的な津波観測の可能性を明らかにすることを目的としている。このために、本研究では津波が観測されている可能性がある衛星画像の検索を行った。検索は海底地震発生直後の震源地周辺の海面を対象に行い、津波が観測されている可能性が高い衛星画像に対しては、スペクトル解析によってその波の波長と波向を明らかにした。さらに、本研究では衛星リモートセンシングによるインド洋大津波の観測の可能性と今後の課題についての議論も行った。

2. 人工衛星による海底地震発生直後の震源地周辺の海面観測

(1) 地震データについて

本研究で用いる地震データは、米国地質調査所 (USGS) のホームページ (2004-10-15 参照) より収集した。通常、マグニチュード 6 より小さい地震によって、被害津波が発生することはないが、断層運動に起因した海面変動が震源地周辺の海面で生じている可能性はある。このため、本研究ではこの海面変動を考慮して、全世界で起きたマグニチュード 4 以上の地震を解析対象とした。検索は 1979 年 2 月～2003 年 5 月の期間を対象に行った。検索の結果、本研究の条件に一致する地震データは 165,837 件あった。

(2) 衛星データについて

本研究で用いる衛星データは、宇宙航空研究機構地球観測情報システムのホームページ (2004-6-15 参照) より収集した。検索を行った衛星データは LANDSAT-TM, LANDSAT-MSS 及び ERS1-SAR の画像データである。LANDSAT-TM の画像データとしては CH1～CH4 の可視・近赤外域のデータを用い、LANDSAT-MSS の画像データとしては CH4～CH7 の可視・近赤外域のデータを用いた。

* 正会員 日本プロセス株式会社

** 正会員 博(工) (独法)情報通信研究機構

*** 正会員 博(工) 秋田大学助教授工学資源学部土木環境工学科

**** 学生会員 秋田大学大学院工学資源学専攻土木環境工学専攻

表-1 衛星データの分類分けの時間条件

グループ	条 件
A	地震発生後0～10分以内に観測
B	地震発生後10～20分以内に観測
C	地震発生後20～30分以内に観測
D	地震発生後30～60分以内に観測
E	地震発生後1～3時間以内に観測
F	地震発生後3～12時間以内に観測
G	地震発生後12～24時間以内に観測

表-2 衛星データの分類分けの空間条件

グループ	条 件
1	震源位置が画像中に含まれる。
2	震源位置が画像の外側0.5° 以内に含まれる。
3	震源位置が画像の外側1.0° 以内に含まれる。

LANDSAT-TM と LANDSAT-MSS の画像データの検索は、日本周辺で観測されたものを対象に行った。一方、JERS1-SAR の画像データの検索は、観測されたすべての画像データを対象に行った。また、衛星データの検索は、地震データの検索期間と同じ1979年2月～2003年5月の期間を対象に行った。検索の結果、本研究の検索条件に一致する LANDSAT-TM と LANDSAT-MSS の画像データは281,161シーン、JERS1-SAR の画像データは387,552シーンそれぞれあった。

(3) 地震データと衛星データの照合

本研究では、衛星データを以下の二つの条件を用いて21分類した。

a) 時間条件

地震の発生時間によって、表-1 に示す7つのグループに衛星データを分類する。

b) 空間条件

地震の発生場所によって、表-2 に示す3つのグループに衛星データを分類する。

上記の条件で分類分けされたグループの中で、衛星が津波を観測している可能性が高いグループは、A-1（地震発生後0～10分以内に観測され、かつ震源位置が画像範囲内に含まれる）から C-3（地震発生後20～30分以内に観測され、かつ震源位置が画像範囲外で1°以内に含まれる）のグループであると考えられる。そこで、本研究では A-1～C-3 のグループを解析対象グループとした。表-3 に各衛星の画像データのグループ分け結果を示す。

(4) 衛星データの解析方法

衛星データの解析は、以下に示す手順で解析する。なお、本研究では衛星データとしてクイックルック画像を

表-3 衛星データの分類分け結果

グループ	LANDSAT-TM, -MSS	JERS1-SAR
A-1	9	0
A-2	14	2
A-3	25	14
B-1	13	0
B-2	13	0
B-3	23	6
C-1	6	0
C-2	15	2
C-3	36	4

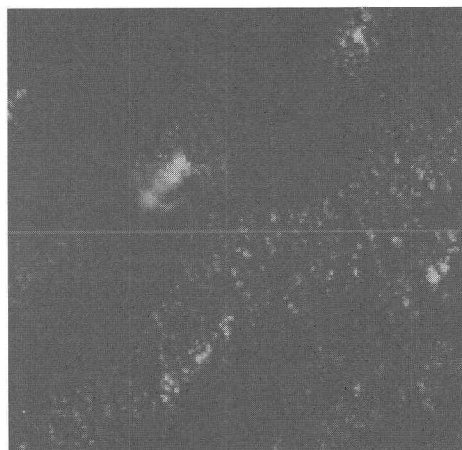


図-1 LANDSAT-MSS 画像 (1984年8月24日)

用いたため、波高に関する解析を行うことはできなかった。

手順1

目視による判読（例えば、村井ら（1992））により、画像中に津波が映像化されているか確認する。また、画像中に津波発生に伴う海面に異常がないか（津波発生時に生じる分散波などが映像化されているか）を確認する。

手順2

津波が映像化されている可能性が高い画像をフーリエ変換（スペクトル解析）し、二次元波数スペクトル（例えば、飯坂ら（1998）や古濱ら（1993））を算定する。

手順3

手順2で算定した二次元波数スペクトルから、映像化されている津波の波長及び波向を算定する。

手順4

映像化された津波の空間的な挙動特性を明らかにするために、津波の波数成分のエネルギーのみを用いて二次元波数スペクトルを逆フーリエ変換し、画像を再構成する。

(5) 衛星データの解析結果

a) LANDSAT-TM 画像と LANDSAT-MSS 画像による津波観測

LANDSAT-TM 画像と LANDSAT-MSS 画像は雲の影響を強く受けるため、各解析対象画像中の雲の被覆率を確認した。その結果、震源地付近の海域において雲の被覆率が低くかった A-1 グループの 1984 年 8 月 24 日 8 時 42 分 20 秒の LANDSAT-MSS 画像（シーンセンター（北緯 30.3° ，東経 138.48° ））を解析対象画像とした。

図-1 に解析対象の LANDSAT-MSS 画像を示す。この画像は海底地震発生（1984 年 8 月 24 日 8 時 36 分 3 秒，震源（北緯 29.8° ，東経 138.75° ））の約 6 分後に観測されたものである。海底地震は画像の中心付近で発生し、地震のマグニチュードは 4.8，震源の深さは 446 km であった。目視による判読はバンド毎（CH4～CH7）に行った。その結果、津波と海面の異常を震源地周辺海域で確認することができなかった。これは震源の深さが 300 km より深かったため、地震に伴う海底変動が小さく、海面までその変動が伝わらなかったためであると考えられる。

b) JERS1-SAR 画像による津波観測

目視による判読の結果、A-2 グループに分類された 1994 年 5 月 7 日 1 時 10 分 58 秒の JERS1-SAR 画像（シーンセンター（北緯 36.72° ，東経 141.28° ））中に、海面の異常（後方散乱係数の変化）を確認した。図-2 にその画像を示す。白色は後方散乱係数が高い部分を表し、黒色は後方散乱係数が小さい部分をそれぞれ表している。この画像は海底地震発生（1994 年 5 月 7 日 1 時 10 分 27 秒，震源（北緯 36.44° ，東経 141.58° ））の 31 秒後に撮影されたものである。この海底地震のマグニチュードは 4.9 で、震源の深さは 38 km であった。海面の異常は図-2 の白枠で囲まれた 34 km 四方の海域で確認された。この海面の異常が津波によるものなのかを明らかにするために、スペクトル解析を行った。

図-3 にスペクトル解析により得られた二次元波数スペクトルを示す。横軸と縦軸はそれぞれ X 方向，Y 方向の波数を表わし、黒色がスペクトルのエネルギーが大きいことを表わしている。この図より、X 軸から 30° 方向あるいは 210° 方向に進行する波と 120° 方向あるいは 300° 方向に進行する波のエネルギーが卓越している。それぞれのスペクトルピークの波数から推算される波長は共に 15.3 km である。

これらのスペクトルピークが津波によるものなのかを明らかにするために、4 km 以上の波長成分のみを用いて二次元波数スペクトルを逆フーリエ変換し、画像の再構成を行った。図-4 に再構成された JERS1-SAR 画像を示す。もし、SAR 画像中に津波が映像化されている場合には、津波は白と黒のストライド縞模様で映像化さ

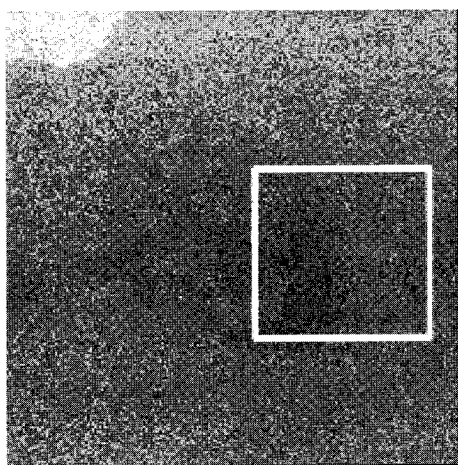


図-2 JERS1-SAR 画像（1994年5月7日）

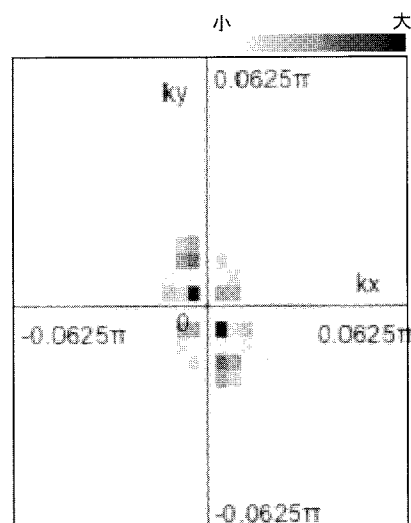


図-3 解析海域の二次元波数スペクトル

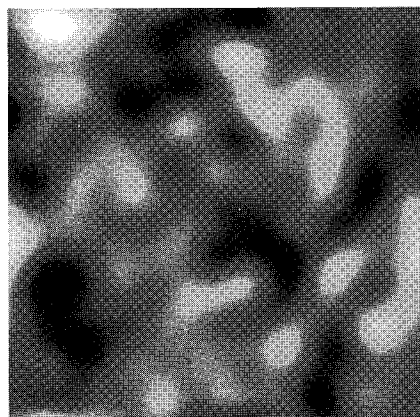


図-4 解析海域の再構成された JERS1-SAR 画像

れる。しかしながら、図-4にはそのようなパターンは存在しない。このため、図-2の海面の異常は津波によって引き起こされたものでなく、別の現象（例えば、大気現象など）によって引き起こされた可能性が高い。

3. 人工衛星によるインド洋大津波の観測

インド洋大津波はスマトラ島西方沖を震源としたマグニチュード9.0の地震によって生じ、インド洋沿岸域を中心に犠牲者14万人を越える大災害を引き起こした。ここでは、衛星リモートセンシングによってこの津波の観測が可能であるかを検証した。

(1) 衛星データの収集

衛星データはGISTA (Geo-Informatics and Space Technology Development Agency) ホームページ上(2004-12-28参照)の検索システムによって収集した。検索した衛星データは、LANDSAT-TM, LANDSAT-MSS, SPOT-HRVIR, IRS-LISS III, ERS2-SAR及びRADARSAT-SARの画像データである。この検索は、インド洋全域で観測された人工衛星の画像データを対象に、地震発生(2004年12月26日0時58分50秒)から23時間後(2004年12月26日23時58分)までの期間に対して行った。

(2) RADARSAT-SAR 画像による津波の観測

検索の結果、スリランカ沿岸を観測したRADARSAT-SARの画像データ(4シーン)が検索条件を満たした。図-5にRADARSAT-SARの各画像データの観測範囲を示す。目視による判読の結果、スリランカ南東沖の海面を観測したRADARSAT-SAR画像(図-5の①)中に、津波によると思われる後方散乱の変化を確認した。

図-6にその画像(観測日時:2004年12月26日12時47分23秒, シーンセンター(北緯6.19°, 東経81.57°))を示す。この画像は海底地震発生(2004年12月26日0時58分50秒, 震源(北緯3.298°, 東経95.778°))の約12時間後に観測されたものである。白枠で囲んだ海域の中に、津波の可能性がある波を確認できる。インド洋大津波の第一波は、その発生後約2時間でスリランカ沖に到達していることが、これまでの調査報告(富田, 2005)で明らかになっている。このため、図-6の画像中の波が津波を映像化したものであるとすると、津波の第一波ではなく、後続の波である。

この波の波長と波向を推算するために、白枠で囲んだ海域(50 km × 100 km)をスペクトル解析した。図-7にスペクトル解析により得られた二次元波数スペクトルを示す。この図より、津波の可能性がある波は、X軸から150°方向あるいは330°方向に進行していることがわかる。スペクトルピークの波数から推定される津波の可

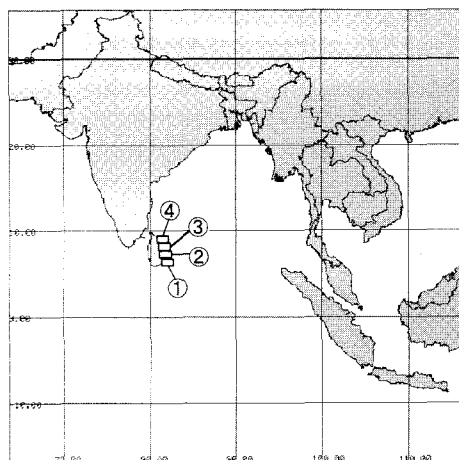


図-5 RADARSAT-SARの観測範囲

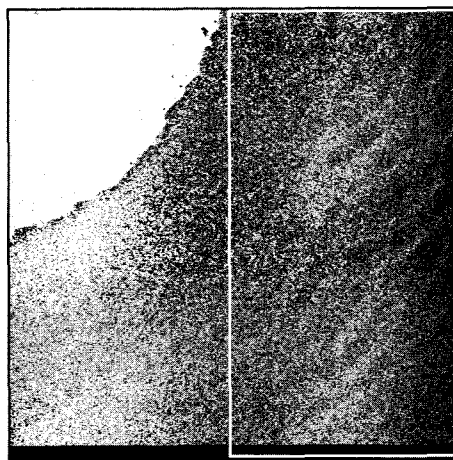


図-6 RADARSAT-SAR 画像 (2004年12月26日)

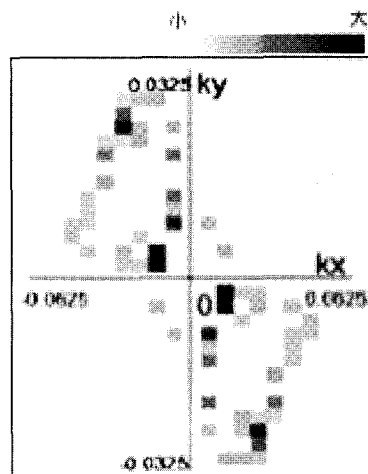


図-7 解析海域の二次元波数スペクトル

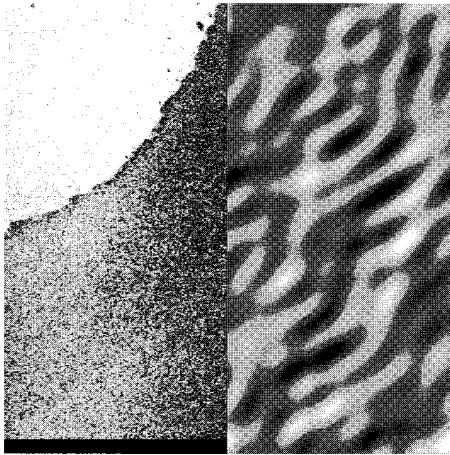


図-8 再構成されたRADARSAT-SAR画像

能性がある波の波長は約24.3 kmである。

次に、津波の可能性のある波の空間的な挙動を明らかにするために、6 km以上の波長成分のみを用いて二次元波数スペクトルを逆フーリエ変換し、RADARSAT-SAR画像の再構成を行った。図-8に再構成されたRADARSAT-SAR画像を示す。この図より、津波の可能性のある波がスリランカ南東部の沖合から沿岸に接近している様子を確認することができる。

4. ま と め

(1) 本研究では衛星リモートセンシングによる津波観測の可能性を明らかにするために、衛星が津波を観測している可能性のある衛星画像(LANDSAT-TM画像、LANDSAT-MSS画像、JERS1-SAR画像)の検索を行った。検索は海底地震発生直後の震源地周辺の海面を対象に行った。その結果、LANDSAT-TM画像、LANDSAT-MSS画像及びJERS1-SAR画像中において、津波と地震に伴う海面の異常を確認することはできなかった。

(2) 本研究では衛星リモートセンシングによるインド洋大津波の観測の可能性について検討した。その結果、スリランカ沖南東海域を観測したRADARSAT-SAR画像中に津波によると思われる後方散乱の変化を確認し、スペクトル解析によってその波の波長(約24.3 km)と方向を明らかにした。また、津波と思われる波の空間的な挙動を明らかにするために、6 km以上の波長成分のみを用いてRADARSAT-SAR画像の再構成を行った。この再構成処理により、津波と思われる波が沖合からスリランカ南東部の海岸に接近している様子を明らかにした。

今後は津波伝播の数値計算を実施し、今回解析を行ったRADARSAT-SAR画像の観測時間にスリランカ沖南東海域にどのような津波が継続して来襲しているかを調査し、今回観測した津波と思われる波が津波であるかどうかを検証していく必要がある。また、SAR画像より波高を推算し、数値計算結果との比較・検証も行う必要がある。

(3) SARによる津波観測は、可視域のセンサーによる津波観測と比較して昼夜に関係なく、かつ大気の影響を受けずに観測を行うことができるため実用的である。しかしながら、その観測範囲(100 km × 100 km)は津波を観測する上で十分なものではない。今後は、RADARSAT衛星で実用化されているSCAN SARのような広域観測(観測範囲: 500 km × 500 km)が可能なレーダによる津波観測を検討していく必要がある。

謝辞: 本研究は、宇宙開発事業団よりLANDSAT-TM、LANDSAT-MSS及びJERS1-SARのクイックルック画像の提供を受け、GISTAよりRADARSAT-SARのクイックルック画像の提供を受けた。(財)リモートセンシング技術センターの伊藤恭一氏より衛星データの検索についてのアドバイスを頂いた。また、また、文部科学省特別研究推進費(代表: 河田恵昭 京都大学教授)の補助を受けた。ここに記して謝辞を表わします。

参 考 文 献

- 飯坂謙二監修(1998): 合成開口レーダ画像ハンドブック, 日本写真測量学会編, 朝倉書店, 208 p.
- 石田祐介・今中剛・今村文彦(1998): 三陸沖での新しい監視方法による津波情報提供の可能性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 386-390.
- (独) 宇宙航空研究開発機構: 宇宙航空研究開発機構地球観測情報システムホームページ, <https://isswww.eorc.jaxa.jp/iss/jp/index.html>, 参照2004-6-15.
- 富田孝史(2005): 2004年インド洋大津波によるスリランカ被害現地調査報告(速報版), 5 p.
- 永井紀彦, 小川英明, 寺田幸博, 加藤照之, 久高将信(2003): GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1411-1415.
- 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信(1993): 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング, 電子情報通信学会, 275 p.
- 村井俊治監修(1992): 図解リモートセンシング, 日本リモートセンシング研究会編, 社団法人日本測量協会, 308 p.
- GISTDA: Geo-Informatics and Space Technology Development Agency, <http://www.gs.gistda.or.th/>, 参照2004-12-28.
- USGS: USGS Earthquake Hazards Program ホームページ, http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html, 参照 2004-10-15. 412