

# 早期津波検出に向けた海洋短波レーダの 分解能の高度化に関する研究

TSUNAMI EARLY DETECTION:  
ENHANCED RESOLUTION OF HF OCEAN RADAR

小海尊宏<sup>1</sup>・藤田裕一<sup>1</sup>・千葉修<sup>1</sup>・伊藤浩之<sup>1</sup>・村嶋陽一<sup>2</sup>・金津伸好<sup>3</sup>  
Takahiro KOKAI, Yuiti FUJITA, Osamu CHIBA, Hiroyuki ITO, Yoichi MURASHIMA,  
Nobuyoshi KANATSU

<sup>1</sup>長野日本無線株式会社 無線応用技術部 (〒381-2288 長野県長野市稲里町1163)

<sup>2</sup>正会員 国際航業株式会社 海洋情報室 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)

<sup>3</sup>国際航業株式会社 海洋情報室 (〒183-0057 東京都府中市晴見町2-24-1)

HF ocean radar is an equipment, for instantaneously sensing velocity distribution of sea surface current. It has a wide field of view, which extends approximately  $\pm 45^\circ$  in direction and beyond 50km in distance. There are high expectations that the radar observation of Tsunami will become a new road path for preventing disasters.

In this paper, we describe a method to enhance the resolutions of radar in both time and current. At first, resolutions required for tsunami observation are estimated by simulating a Tokachi-oki earthquake tsunami (2003). Here it is pointed out that traditional data processing indicates inadequate resolutions for tsunami early detection. Secondly, two techniques are proposed to achieve the necessary resolutions. Short-time Fourier transform (STFT), in place of normal FFT, enhances the time resolution of Doppler analysis. Further, zero-padding technique improves the current resolution, by interpolation of data within the frequency domain. Finally, by means of simulation, it is verified that these proposed techniques give improved resolutions in both time and current.

**Key Words :** *Tsunami, Surface flow, HF Radar, Sea echo, Doppler shift, FFT, STFT, Zero-padding, Peak detection*

## 1. はじめに

海洋短波レーダ (以下, レーダ) は, 沿岸海域の表層流や波浪を面的かつ広範囲に観測できることから, 海域環境の保全や海域の流動を研究する分野で多く用いられている。

陸上に設置したレーダは, レーダ周波数や送信電力により数十 km から数百 km 離れた沖合いの表層流を測ることができる。このレーダで津波の来襲を監視できれば, 被害を軽減できる可能性がある。これまで, レーダによる津波の実観測例は報告されていないが, 津波観測の可能性についてはいくつかの検討がなされている<sup>1)2)3)4)</sup>。

これらの先行研究の多くは, レーダにより津波の流速変化が理想的に得られることを仮定して検討されているが, 具体的なレーダの観測仕様やその実現性については, 十分に検討されていない。

著者らは, レーダによる津波観測について, 次の2つの問題点に着目した。

1 つ目の問題点はレーダの観測時間の長さである。従来のレーダでは通常 約 8.5 分の観測時間により

流れ観測を行っている。しかし, レーダによる流速変化で津波を監視する場合には, 津波の伝播速度とレーダ観測範囲や空間分解能の関係から, より短時間の観測で流速情報を得て, 津波による流速変化の有無を見つけなければならない。

2 つ目の問題点は, 流速分解能である。浅水効果が小さい沖合い海域では, 津波により引き起こされる流速変化も小さい。そのため, 沖合いで津波を検出するためには, 流速分解能を高める必要がある。

本研究では, 短時間で, より高い流速分解能を有するレーダ観測を実現するための具体的な信号処理手法を検討した。その結果, 観測時間の問題は短時間フーリエ変換で, 流速分解能の問題はゼロ詰め法で改善できることを確認し, レーダで沖合い津波による流速変化を検出する見通しを得たので報告する。

本稿では, 第2章で従来レーダの観測方法を説明し, 第3章では, レーダで津波観測を行う場合に必要分解能を検討する。第4章でこれら分解能を実現する信号処理手法を提案する。第5章で提案手法をシミュレーションで検証する。第6章では, 全体のまとめと今後検討すべき課題を示す。

## 2. 従来の海洋レーダ

本章では、従来の流れ観測に使用されているレーダの概要を説明する。

周波数 24MHz のレーダの基本諸元を表-1 に示す。陸上に設置されたレーダ局 (1 局) の観測範囲は、レーダ正面から±45°、距離 1.5km～約 50km である。レーダは、この範囲の海面を 512 秒にわたって電波で照射し、海面により後方散乱された電波のドップラスペクトルから視線方向の流速を算出して、流速分布を出力する。

表-1 従来レーダの基本諸元

レーダ基本諸元	レーダ周波数	24.515MHz	
	レーダ形式	FMICW	
アンテナ諸元	指向性合成方式	受信 DBF	
	ビーム幅	12°	
	アンテナ本数	送信 1 本 受信 8 本	
空間諸元	観測範囲	距離	1.5km～約 50km
		方位	正面から±45°
	距離分解能	1.5km	
時間諸元	方位分解能	7.5°	
	観測時間	512s (1024 掃引)	
観測性能	観測周期	通常 1h	
	流速分解能	4.8cm/s	

海面で後方散乱し、受信アンテナで受信された信号は、図-1 の方法で処理される。図中の DBF (Digital Beam Forming) 処理は、広い指向性を持つ複数のアンテナの受信信号を、計算機上で位相合成し、任意方位に狭いビームを形成する処理である。

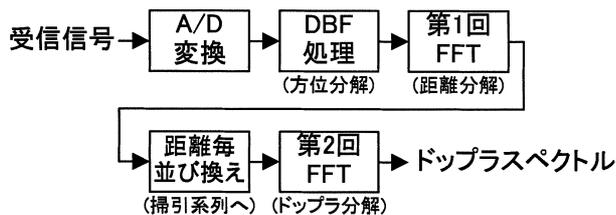


図-1 レーダ受信信号の解析方法

図-1 の処理により、図-2 のドップラスペクトルが得られる。流速は、このドップラスペクトルの 1 次散乱ピーク周波数から算出される。流速分解能は 4 章の式 (1), (2) により決定され、表-1 のレーダでは 4.8cm/s である<sup>5)</sup>。

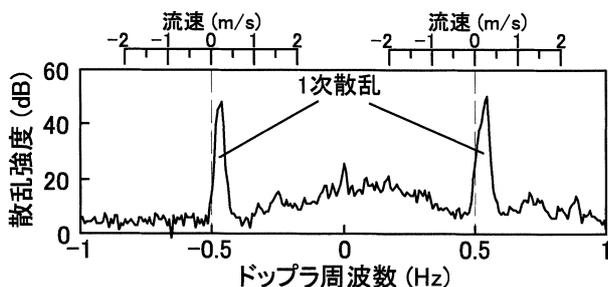


図-2 ドップラスペクトルの例

## 3. 津波観測に必要なレーダ分解能

### —十勝沖地震津波の事例から—

本章では、レーダによる流速観測から津波監視する場合に必要な分解能と、表-1 のレーダを津波観測に適用する場合の問題点をケーススタディにより検討する。

津波により引き起こされる流速変化は、当然ながらその波源、海底地形、観測場所により異なる。レーダによる津波観測の適用性を検討するため、近年発生した津波のうち、周期的に地震が発生し、それに伴う津波が被害をもたらした 2003 年十勝沖地震津波をケーススタディとして検討した。この津波により海岸では 2～3m の水位変動が記録され、釣り人が行方不明となる人的被害が発生している。地震発生から第一波の海岸到達まで約 15 分であった。

本研究では避難時間を考慮して第一波到達 10 分前の津波検出を目標とした。この段階から津波による流速変化を面的に連続して観測できれば、避難誘導から救援活動まで、津波被害軽減に寄与する情報を提供することができると考えられる。

この津波による流速変化を、表-2 に示す津波シミュレーションにより求めた。

表-2 津波シミュレーション計算条件

項目	計算条件
基礎式と解法	900m: 線形長波理論 300m: 非線形長波理論 Leap-Frog 差分法
計算格子	波源から沿岸: 900m, 300m
計算時間間隔	0.1秒
地盤変動量計算	Mansinha and Smylie (1971) <sup>6)</sup> の方法による
震源モデル	Tanioka ら <sup>7)</sup> で示された震源モデルすべり量を 1.51 倍した
潮位条件	T. P. +59cm (2003 十勝沖地震の発生時の大津水位観測所の水位)

このシミュレーション結果と、十勝港沖に設置された海象計 (位置を図-4 に示す) との水位変化の比較を図-3 に示す。この図から、シミュレーション結果と海象計の水位変化はよく一致している。

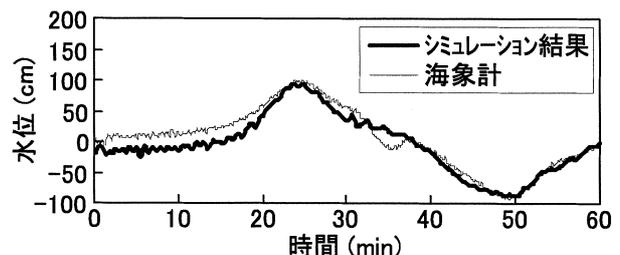


図-3 海象計とシミュレーションの水位変化

本検討では、図-4 のように A 局と B 局に設置したレーダによる津波観測を想定し、シミュレーション結果からレーダビーム視線上の流速変化を求めた。

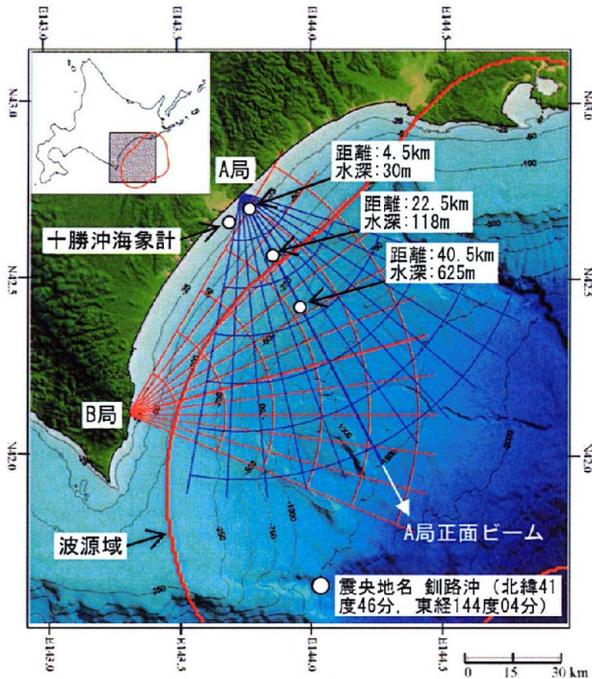


図-4 十勝沖地震津波の流速シミュレーションにおけるレーダ局の配置と観測範囲

図-4 に示した A 局ビーム上の 4.5km, 22.5km, 40.5km 地点での流速変化を図-5 (a) ~ (c) に示す。流速の符号はレーダ局に向かう方向を正とした。

図-5 (a) (4.5km) では数十 cm/s の流速変化がみられるが、同図 (b) (22.5km) では十数 cm/s, さらに沖合いの同図 (c) (40.5km) になると数 cm/s の小さな変化しかみられない。目標の第一波海岸到達の 10 分前で津波の流速変化を捉えるためには、図-5 (b), (c) に示した 20km 以上沖合いで流速変化を捉える必要がある。また、流速の時間変化を早期に捉えるためには、連続的に観測を行い、数分間隔で結果を出力する必要がある。

このケーススタディでは、レーダによる津波観測

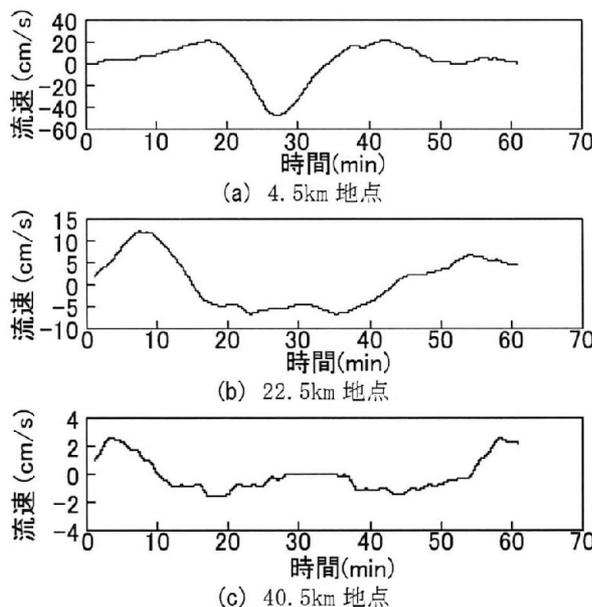


図-5 流速シミュレーション結果

には以下の動作及び分解能が必要となる。

- 観測動作 常時(連続観測)
- 時間分解能 約 2分
- 解析出力間隔 約 1分
- 流速分解能 約 1cm/s

ここで、表-1 に示したレーダの津波観測への適用を考える。受信 DBF 方式は、全方位を同時に電波で照射し、受信後の信号処理で方位を分離するため、観測時間が短い特徴がある。また、観測距離が約 50km あるため、沖合いの津波を観測することができる。このため、大筋では津波観測に適した方式である。しかし、従来の信号処理では、1 回の結果出力に約 8.5 分の観測時間が必要であり、流速分解能は 4.8cm/s である。これらは上記の津波観測に必要な分解能に適合しないため、時間分解能と流速分解能の改善が必要である。

#### 4. 高分解能化手法の提案

##### (1) 時間分解能の改善

前章で示した短時間観測を実現するために、図-1 における第 2 回 FFT に着目する。この FFT は、特定観測地点の受信信号の全時系列 (512 秒, 1024 掃引) からドップラスペクトルを求めている部分で、レーダの時間分解能を決めている部分である。

従来の解析手法を図-6 に示す。従来手法では S/N 改善のため、全体を 7 区間 (No. 1~7) に分けてドップラスペクトル求め、これを平均している。この処理は、観測対象の流速が観測中 (512 秒) は一定、雑音はランダムであるという仮定に基づくものである。しかし、津波による流速は数分間で大きく変化してしまうため、この平均化処理により津波による変動も平均化され検出が難しくなってしまう。

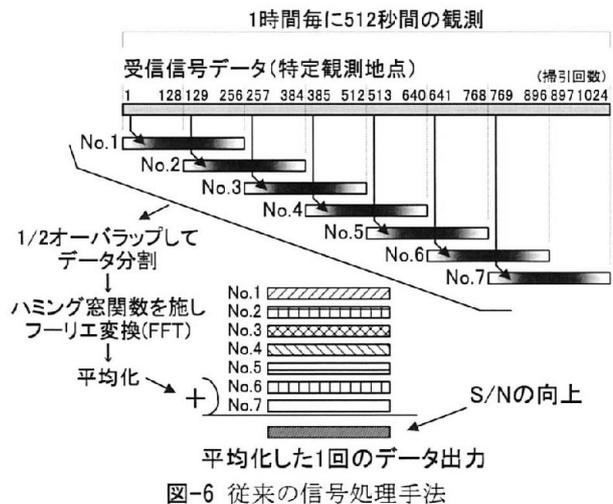


図-6 従来の信号処理手法

著者らはこの問題点を解決し、3 章で示した分解能を満足させるため、図-7 示すように、時間-周波数解析法である短時間フーリエ変換 (Short-Time Fourier Transform, 以下 STFT) の導入を検討した。

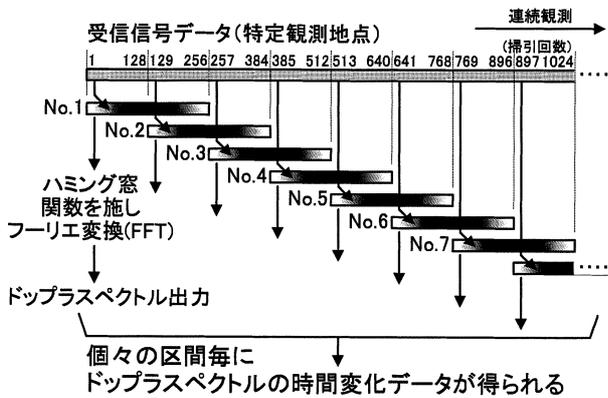


図-7 提案する信号処理手法

この方法は、入力データに対して窓関数を時間的にオーバーラップさせながら施した後、窓区間内のデータをフーリエ変換していく方法で、これによりドップラスペクトルの時間変化を得ることができる。STFT 法における窓関数の幅が時間分解能となり、本稿では必要となる時間分解能(約 2 分)から、窓関数の幅を 128 秒 (256 掃引) に設定した。

STFT 法により、1 回の観測結果出力に要する時間は従来の 512 秒から 128 秒に短縮され、出力間隔 64 秒となる。この手法により、従来レーダで観測された 1 観測分のデータを処理し、ドップラスペクトルの時間変化が明らかになった例を図-8 示す。

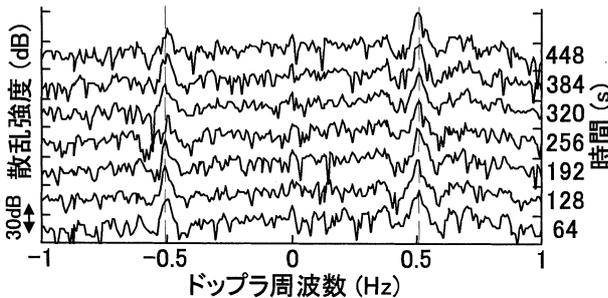


図-8 STFT 法によるドップラスペクトルの時間変化 (従来の実観測データを使用)

しかし、STFT 法は平均化がない分、従来手法よりドップラスペクトルの S/N が劣化する。この影響を確認するため、図-8 のスペクトルを用いて、従来手法と S/N を比較した結果を図-9 に示す。同図中、従来手法の線は図-8 のデータを従来手法で全区間平均したもの、STFT 法の線は図-8 の時間 64s のスペクトルである。

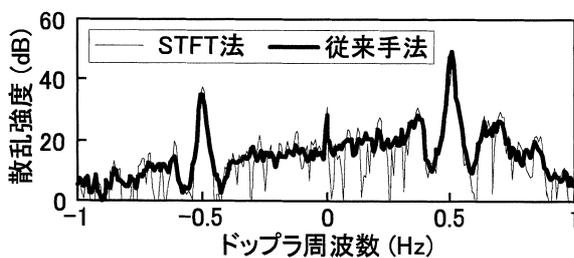


図-9 STFT 法と従来手法のドップラスペクトル

図-9 から、STFT 法の S/N は従来手法より劣化しているが、1 次散乱ピークの形状は劣化していないことが分かる。津波観測では、1 次散乱のピーク位置情報のみが必要なため、S/N 劣化の影響は問題ないと判断した。

以上の検討から、STFT 法により従来の流速分解能を維持しながら時間分解能を改善できることが示された。

## (2) 流速分解能の改善

流速分解能  $\Delta v$  は、レーダ周波数 (電波の周波数)  $f$ 、光速  $c$ 、ドップラ周波数分解能  $\mathcal{D}$  として式 (1) で与えられる。

$$\Delta v = \frac{\mathcal{D}}{2f} c \quad (1)$$

ここでドップラ周波数分解能  $\mathcal{D}$  は、観測時間を  $T_A$  として式 (2) となる。

$$\mathcal{D} = \frac{1}{T_A} \quad (2)$$

式 (1)、(2) から流速分解能は観測時間に反比例し、高い流速分解能を得るためには、長い観測時間が必要であることが分かる。

前節で提案した STFT 法では、観測時間  $T_A$  は窓関数の時間幅に等しい。従って、この方法 (窓関数の時間幅 = 約 2.1 分) で得られる流速分解能は、4.8 cm/s であり、目標値 (約 1 cm/s) に達しない。また、この目標値を満たすための観測時間は、約 10 分となるが、津波観測ではこのような時間はかけられない。

そこで、短時間観測を維持して流速分解能を向上させるために、本研究では図-7 の STFT 法にゼロ詰め法を導入すること提案する。ゼロ詰め法は、観測データにゼロデータを追加して入力データ数を増加させてから FFT を行う方法である。入力の時系列データに適用すると、出力の周波数領域でデータ点が補間され、ピーク位置をより正確に求めることができるようになる。

FFT の場合、窓関数の長さ  $N$  (入力データ数: 図-7 では 256)、サンプリング周波数  $f_s$  として、 $T_A$  は  $N/f_s$  となるので、式 (2) は式 (3) となる。

$$\mathcal{D} = \frac{f_s}{N} \quad (3)$$

表-1 に示した 24MHz レーダでは、1 掃引の時間は 0.5 秒であるため、 $f_s$  は 2Hz である。ゼロ詰め法により擬似的に  $N$  を増加させ、 $\mathcal{D}$  を小さく (流速分解能を向上) することになる。

ゼロ詰め法の効果をドップラスペクトルで確認するため、正弦波を 2Hz でサンプリングした 256 個の時系列データを FFT した結果を図-10~11 に示す。正弦波の周波数は、流速 0cm/s におけるドップラシフトに対応する 0.505Hz とした。図-10 はゼロ詰めなし、図-11 はゼロ詰めによりデータ数を 4 倍に増やしたものである。図中の点は、FFT 出力点を表す。

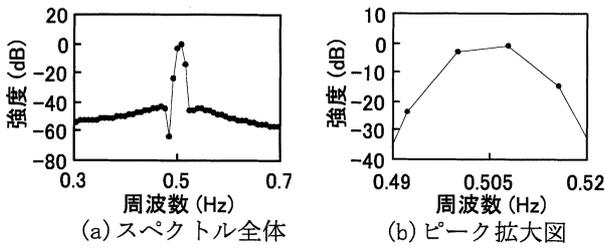


図-10 正弦波のFFT結果  
(ゼロ詰めなし・ハミング窓使用)

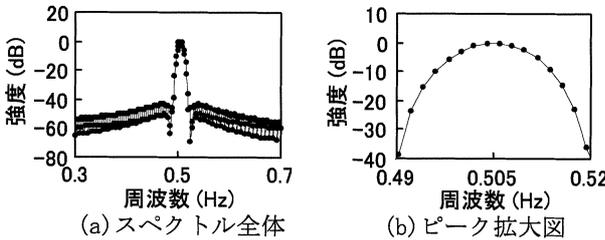


図-11 正弦波のFFT結果  
(ゼロ詰めあり データ数4倍・ハミング窓使用)

図-10 と図-11 を比較すると、ゼロ詰めによりデータが補間された結果、図-11の方がスペクトルのピーク周波数を検出しやすくなったことが分かる。ゼロ追加数をさらに増やせば、より滑らかなスペクトルが得られ、受信信号本来のピークを検出しやすくなる。

しかし、実際に観測時間を長くして実データにより  $N$  を増やした場合はスペクトルの幅が狭くなって鋭いピークが得られるが、ゼロ詰めの場合はいくまでも補間であり、鋭いピークが得られるわけではない点に注意が必要である。

以上の検討から、STFT法とゼロ詰め法の導入により、短時間観測と流速分解能の両方を同時に改善することができた。

## 5. ドップラ解析シミュレーションによる検証

前章では、津波観測に必要な分解能を得るための信号処理手法として、ドップラ解析にSTFT法とゼロ詰め法の導入を提案した。本章では、十勝沖地震津波の流速観測(図-4~5)にこれら手法を適用したドップラ解析シミュレーションを行い、提案手法を検証した。なお、従来の約8.5分観測では津波の流速変化に追従できないことが明白なため、STFT法の適用を前提としてゼロ詰め法の効果を検証した。

### (1) 検証方法

検証の手順を図-12に示す。最初に、受信信号を模擬した解析用信号を作成した。解析用信号は、流速が0cm/sでのドップラシフト周波数( $\pm 0.505\text{Hz}$ )の正弦波信号を、図-5の津波流速変化に対応したドップラシフトで周波数変調することにより作成した。なお、本研究では時間および周波数分解能に注目しているため、距離による解析用信号の振幅変化

は考慮せず、一定とした。また、サンプリング周波数は従来レーダと同様の2Hzとした。

次に、この解析用信号をSTFT解析し、スペクトルの時間変化を求めた。この際、ゼロ詰めありと、ゼロ詰めなしの両方のケースで計算を行った。

最後に、得られたドップラスペクトルから1次散乱のピーク周波数を求め、これを流速値に変換して図-5の流速変化と比較した。詳細を表-3に示す。

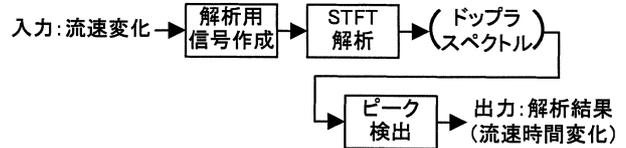


図-12 検証の手順

表-3 検証方法の詳細

項目		設定値
流速変化	津波の流速変化	十勝沖地震津波(2003年)流速シミュレーション(図-5)
	津波以外の流速変化	考慮しない
解析用信号作成	流速0cm/sでのドップラ周波数	$\pm 0.505\text{Hz}$ (流速0cm/s時)
	津波流速相当のドップラシフト	津波流速に対応するドップラシフトで周波数変調
	サンプリング周波数	2Hz
	解析信号振幅	1(ドップラ周波数 +/- 共)
STFT解析	窓関数	ハミング窓
	窓関数長さ	256データ(128s)
	窓移動量	128データ(64s)
	ゼロ追加数	・3840個(ゼロ詰めあり) ・なし(ゼロ詰めなし)
	解析データ数	・4096個(ゼロ詰めあり) ・256個(ゼロ詰めなし)
ピーク検出	スペクトルの最大値	

### (2) 検証結果

図-5(a) (4.5km)の流速変化を入力として得られたドップラスペクトルの時間変化を図-13に示す。STFT法により、入力変化に追従したドップラスペクトルが得られていることが分かる。

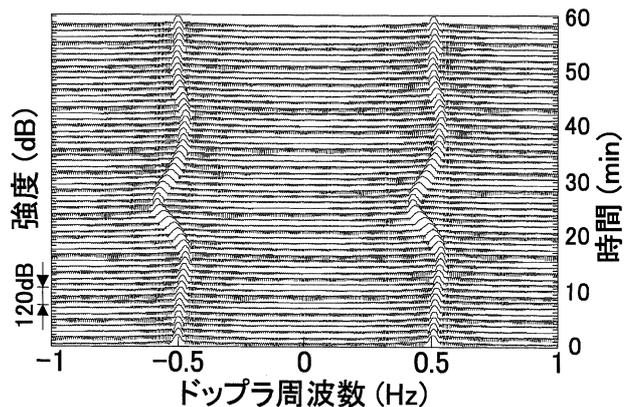


図-13 4.5kmのドップラスペクトルの時間変化  
(ゼロ詰めあり データ数16倍)

次に、得られたドップラスペクトルの最大値から流速値を求めた結果を図-14~15に示す。図-14は、ゼロ詰めなし、図-15はゼロ詰めありのものである。

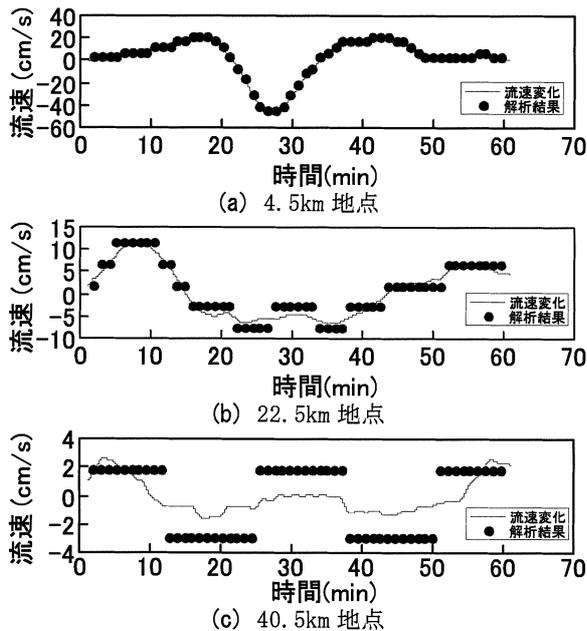


図-14 ゼロ詰めなしの解析結果

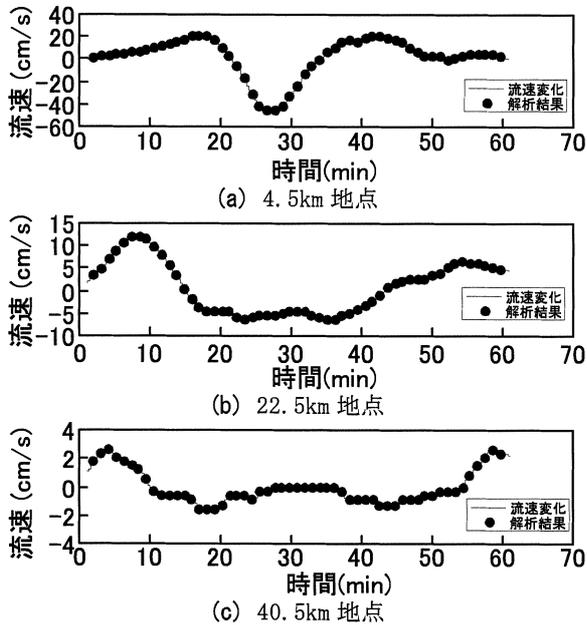


図-15 ゼロ詰めありの解析結果

図-14(a) (4.5km)ではレーダの流速分解能と比べて流速変化が大きいため、ゼロ詰めなしでも解析結果は入力にほぼ追従した。一方、沖合いになると、図-14(b) (22.5km), (c) (40.5km)のように、津波による流速変化が微小なため、ゼロ詰めなしでは分解能が不足して入力に追従しなかった。しかし、図-15(a)~(c)のゼロ詰めありでは、微小な流速変化にも追従した。

以上の結果から、提案手法により高分解能化が達成されたことが確認され、レーダにより沖合い津波の微小な流速変化を検出する見通しが得られた。

## 6. おわりに

### (1) 結論

- ・早期津波検出のためには、短時間観測と流速分解能向上が必要であることを示した。
- ・短時間観測と流速分解能向上のため STFT 法とゼロ詰め法による信号処理手法を提案した。
- ・提案手法により、ケーススタディでの津波による流速変化を観測できることをドップラ解析シミュレーションにより検証した。

以上により、レーダにより沖合い津波による流速変化を検出する見通しが得られた。

### (2) 今後の課題

- ・実海域では津波以外に潮流や吹送流などが存在している。このため、流速データから、面的な津波の流速分布およびその変化パターンを抽出する方法を検討する必要がある。
- ・ゼロ詰め法の適用にあたり、要求される分解能に応じて、ゼロ詰め量を選択する必要がある。この選択基準を検討する必要がある。
- ・ゼロ詰め法では擬似的に流速分解能が向上するが、スペクトル幅は変化しない。必要な流速分解能に応じて、スペクトルを鋭くする検討が必要である。
- ・実際の観測では、ノイズの影響が考えられ、提案手法の S/N 低下による観測最大範囲の縮小を考慮する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸域システム研究室 日向博文室長より海洋レーダの実観測データを提供していただきました。ここに記して厚く感謝します。

### 参考文献

- 1) Barrick, D.E.: A Coastal Radar System for Tsunami Warning, *Remote Sensing of Environment*, vol.8, pp.353-358, 1979.
- 2) 泉宮尊司, 今井達也: 海洋レーダによる海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測に関する研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.246-250, 2005.
- 3) 泉宮尊司, 中島俊秋: 時間平均された海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.246-250, 2006.
- 4) 渡辺一也, 富田孝史: 海洋短波レーダによる津波観測の実現に向けた吹送流成分の除去方法の検討, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.1129-1134, 2007.
- 5) 土木学会: 陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測, p. 212, 土木学会, 2001.
- 6) Mansinha, L. and Smylie, D.E.: The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.61, No5, pp.1433-1440, 1971.
- 7) Tanioka, Y., Hirata, K., Hino, R., and Kanazawa, T.: Slip distribution of the 2003 Tokachi-oki earthquake estimated from the tsunami waveform inversion, *Earth, Planets and Space*, vol.56, pp.373-376, 2004.