

( 1 ) 実施機関名：

東北大学

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

常時微動や後続波を用いた地下構造モニタリング法の研究

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

( 1 ) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

ア．日本列島域

( 4 ) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 1 ) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

ウ．広域の地殻構造と地殻流体の分布

( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

( 3-1 ) 地震発生先行過程

ア．観測データによる先行現象の評価

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

近年、地震波動場の相関を利用して、受動的に地下構造を推定し、その時間変化をモニターする手法がいくつか提案されている。相関を利用するこれらの手法は地震波干渉法と呼ばれるが、手法の適用限界や精度については、まだ明らかではない点がある。そこでまず、原理について理論的考察や数値計算により検討するとともに、既往の手法の適用限界や精度について整理する。続いて、検討結果に基づき、精度や安定性に優れた手法を選び出す。その際、問題点があれば適宜手法を改良する。選ばれた手法に基づいて地下構造の時間変化を検出する解析システムを構築し、実際のデータへ適用することにより地下構造のモニタリングを行うことを最終的な到達目標とする。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度は、これまでに提案されている常時微動や地震記録の後続波の相互相関を利用した受動的モニタリング手法を調査し、適用限界や精度について整理する。また理論的考察や数値計算に基づき手法の原理についての理解を深める。

平成 22 年度は、平成 21 年度の検討結果に基づき、精度や安定性に優れた手法を選びだし、問題点があれば適宜改良する。このようにして、選ばれた手法に基づいて地下構造の時間変化を検出する解析システムを構築する。

平成 23-25 年度は、解析システムを実際のデータへ適用することにより地下構造のモニタリングを行う。特に大地震や火山噴火などの発生が予想されている地域に重点をおき、それらのイベントの発生に伴う地下構造の変化について調査・検討する。その際、長期の変化の傾向を把握することが重要であるので、リアルタイムのデータだけではなく、過去のデータを利用した調査も実施する予定である。

( 7 ) 計画期間中(平成 21 年度～ 25 年度)の成果の概要：

期間中に計画していた課題を予定通り実施した。以下に成果の概要をまとめる。

(a) 受動的モニタリングシステムの実データへの適用

常時微動やコーダ波の相互相関や自己相関からグリーン関数を合成し、そのコーダ波部分を解析する Passive Image Interferometry 法により、地下構造の時間変化の検出を行った。以下にまとめるように、本課題により、大・中地震や火山噴火に伴う地震波速度変化を検出することができた。しかし、前駆的な変化の検出には至らなかった。

2004 年新潟県中越地震 (Mj6.8) の本震発生の前後 2 カ月間にわたり、震源域から 30km 以内の観測点の連続波形記録を用いて、2-8Hz において微動の自己相関、0.1-0.5Hz において微動の 2 観測点間の相互相関を計算した。その結果、本震発生に伴い震源域において地震波速度が最大で 0.5 % 低下したことが分かった。原因としては、強震動による浅い地盤の損傷に加えて、震源断層付近のやや深い場所での破碎による構造の弱化が考えられる。なお本震発生の直前には変化は見られなかった [Wegler et al., 2009]。

2008 年岩手宮城内陸地震 (Mj7.2) の本震発生前後の約 100 日間について、震源域周辺にある約 100 観測点の連続波形データを用いて、周期 1 - 2, 2 - 4, 4 - 8s の帯域で地震波干渉法を適用した。その結果、周期 1 - 2, 2 - 4s の帯域で、本震発生に伴い、本震震央の南側で 0.1 - 0.3 % 程度の地震波速度低下があったことが分かった。また、防災科研 KiK-net の地表と地中の地震計を用いた自然地震の S コーダの相互相関解析も行い、観測点直下の浅部 (深さ 200m 程度以浅) で最大約 5 % の S 波速度変化を検出した。レイリー波の分散性を考えると両者の結果は矛盾なく説明される。浅部の S 波速度低下の要因としては、強震動による浅部地盤の損傷が考えられる [Takagi et al., 2012]。

2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震 (Mj7.2) の前後において、宮城県沖に設置されていた 14 台の海底地震計の連続波形記録を用いて地震波干渉法解析を行った。その結果、0.5-2Hz の帯域で、地震を境にして、微動の自己相関関数が変化したことを検出した。この変化のラグタイム依存性を調べたところ、一様な速度低下を示すような変化と、特定の時刻において波形の相似性が低下することを発見した。これらから、一様な地震波速度低下と、局在化した場所での反射・散乱特性の変化が示唆される [中条, 2012]。

2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) を挟む期間 (2 年間) で、防災科研 KiK-net の地表点で記録された近地地震のコーダ波 (1-20Hz) の自己相関により、浅部地盤構造の時間変化のモニタリングを行った。その結果、本震発生の発生直後に数 10 % (最大 50 % 程度) も地震波速度が低下するが、それがすぐに数 % の低下まで回復し、その後さらに数カ月かけて本震前の状態に戻っていくことが確認された。 [Nakahara, 2014]。

三宅島の 5 観測点の地震計連続データに地震波干渉法を適用し、2000 年三宅島噴火に伴う火山体内部における地震波速度の時間変化を調べた。その結果、0.4 - 0.8, 0.8 - 1.6Hz の帯域で、火山活動に伴い地震波速度が変化していたことを発見した。特に島の北東部の経路に対する相互相関関数は最大で約 2% の地震波速度増加を示し、これは島内の収縮源による静的応力変化が引き起こした地震波速度変化として説明される。一方、山頂とその周辺をまたぐ経路に対する相互相関関数は最大 2% 程度の地震波速度の減少を示し、カルデラ崩壊による地形変化が引き起こす表面波の回折やカルデラの形成に伴う周辺での体積膨張によるものとして説明できる [Anggono, 2011]。

2005 年福岡県西方沖地震 (Mj7.0) の震源から 50km 以内にある 7 観測点における 2003 年から 2010 年の 8 年間にわたる連続波形記録を用いて、0.1-0.5Hz 帯域で微動の 2 観測点間の相互相関を計算した。その結果、地震波速度の時間変化には、年周期的に変化する成分が含まれることが確認された。振幅は観測点間経路により異なるが、最大 ± 0.5 % 程度に達する。年周変化の原因は特定できていないが、微動の入射方向の季節変化によるみかけのもの、地下水位や地温などの季節変化による可能性が考えられる。

平成 25 年度の成果は次の通りである。

2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) を挟む期間 (2 年間) で、防災科研 K-NET で記録された近

地地震のコーダ波(1-20Hz)の自己相関を用いて浅部地盤構造の時間変化を検出した。前年に KiK-net を用いて検出した結果の空間分解能を高めることができた。

また、岩手山麓に独自に設置した短周期地震計アレイ記録に地震波干渉法を適用し、地球潮汐による体積ひずみの膨張時と収縮時での微動の相互相関記録を比較した。その結果、周波数 1-2, 2-4Hz において、膨張時の位相は収縮時に比べて最大で 1%程度遅れていることが分かった。この原因として地球潮汐による浅部地盤のクラックの開閉による可能性が考えられる。この研究は、地震波干渉法により地球潮汐による地震波速度変化を検出した初めての例である [高野, 2014]。

(b) 地震波干渉法についての理論的・数値的研究

佐藤の一連の研究 [Sato, 2009a, 2009b, 2010] により、地震波干渉法において、1 次散乱波を利用することの意義、減衰がある構造に対しても地震波干渉法が成立することが明らかになった。

Margerin and Sato (2011) はファインマンダイアグラムを用いて散乱過程を表すと、光学定理を用いて複数の項 (spurious terms) が相殺することを示した。これにより、高次散乱まで含めて、微動の相互相関関数からグリーン関数を得ることができることが理論的に証明された。

Nakahara (2012) は、減衰性媒質において、地震波干渉法と密接に関係する空間自己相関 (SPAC) 法の定式化に新たに成功した。その結果、従来の減衰構造の推定手法は、比較的均質な構造に対して、減衰が小さく、使用する観測点間の距離が卓越波長に比べて十分大きい場合に成り立つことが分かった。さらにその結果を用いて、中原 (2013) は、地震波干渉法を用いて減衰媒質を推定する既往研究の適用可能性を明らかにし、その手法を適用する際の注意点をまとめた。

Takagi et al. (2014) は、2 点間の波動場の相互相関テンソルの上下-ラディアル成分とラディアル-上下成分の和と差を用いて、P 波とレイリー波を分離する手法を提案し、岩手県遠野市の 3 成分広帯域地震計アレイデータへの適用により、その手法の有用性を実証した。

- ( 8 ) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物 ( 論文・報告書等 ) :  
Takagi, R., H. Nakahara, T. Kono, and T. Okada, Separating body and Rayleigh waves with cross terms of the cross-correlation tensor of ambient noise, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2013JB010824, 2014.  
高野智也, 地震波干渉法に基づく地球潮汐による地震波速度変化の検出, 東北大学修士論文, 2014.

( 9 ) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

中原恒・松澤 暢・他

他機関との共同研究の有無 : 無

( 10 ) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名 : 東北大学大学院理学研究科

電話 : 022-795-6533

e-mail : zisin-yoti@aob.gp.tohoku.ac.jp

URL : <http://www.zisin.gp.tohoku.ac.jp/>

( 11 ) この研究課題 ( または観測項目 ) の連絡担当者

氏名 : 中原恒

所属 : 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻固体地球物理学講座

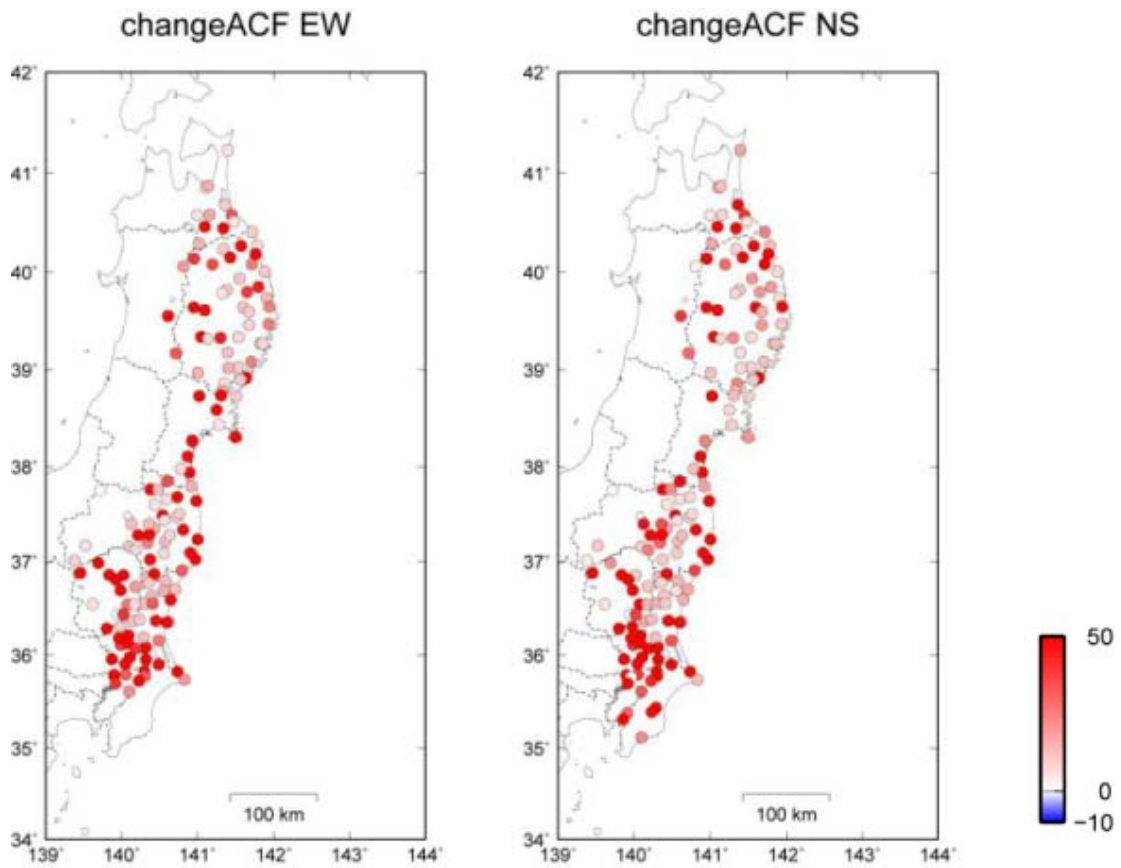


図1 東北地方太平洋沖地震に伴う自己相関の位相の遅れ

左図は東西動成分，右図は南北動成分の結果．東北日本の太平洋岸全域で最大 50 %にも達する位相遅れ（速度低下）が見られる．なお，日本海側は使用できるデータ数が少なく，結果が得られていない観測点が多い．

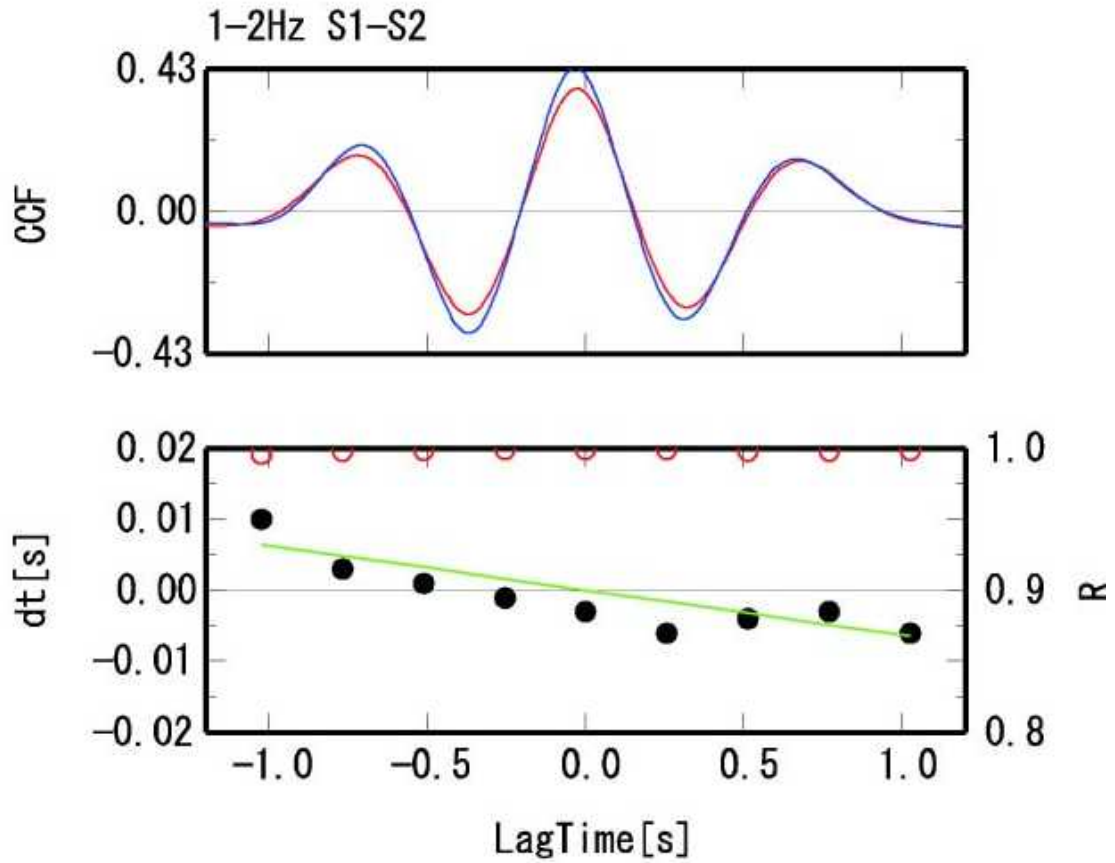


図2 岩手山北東山麓におけるアレイ観測データを用いた地球潮汐に伴う地震波速度変化検出の結果  
 上図は、地球潮汐による膨張時と収縮時の微動の相互相関関数 (CCF) の比較 (観測点1と観測点2のペア、周波数 1-2Hz の例)。赤が膨張時の CCF、青が収縮時の CCF であり、収縮時の方が位相が遅れているように見える。  
 下図の黒丸は、短時間窓を用いた測定した膨張時に対する収縮時の時間差のラグタイム依存性を示し、直線フィットの結果が緑線である。赤丸は相互相関係数を示す [高野, 2014]。