

(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だす。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) 平成 22 年度成果の概要：

今年度は計画していた課題を遂行するとともに、平成 23 年度に計画していた課題を一部先行して実施した。以下に成果の概要をまとめる。

(a) 波形相関を利用した受動的モニタリングシステムの構築

地震波干渉法(より正確には Passive Image Interferometry 法)に基づき、地震波形の連続データを用いて地下構造のモニタリングを行うシステムを構築した。波形相関の計算では、しきい値を用いてイベント記録部分を除去し、必要に応じて周波数領域でクロススペクトル振幅のホワイトニングを行い、さらに時間領域で 2 値化する方法を採用した。

(b) 受動的モニタリングシステムの実データへの適用

三宅島にある防災科研の観測点 5 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。0.4 - 0.8, 0.8 - 1.6Hz の帯域で微動の相互相関解析を行った結果、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た。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た。三宅島の火山活動に伴う地殻変動のモデリングによると島内に収縮源が求められており、今回検出された地震波速度増加は、この地殻変動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、山頂を通過する経路での地震波速度減少は、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によることが波動伝播シミュレーションにより確認された。また山頂付近を通過する経路での速度減少は、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。以上のように 2000 年の火山活動に伴って、地震波速度の増加と減少が同時に起こっていることが分かり、それらの変化は山体の体積変化による静的応力変化とカルデラ崩壊の 2 つのメカニズムにより定量的に説明できることが明らかになった。また地震波干渉法により火山体の内部構造のモニタリングが可能であることを実証できた [Anggono, 2011]。

2008 年岩手宮城内陸地震の震源域周辺にある防災科研 Hi-net, F-net, 気象庁, 東北大学の約 100 観測点の連続波形データを用いて、本震発生前後の約 100 日間について、周期 1 - 2, 2 - 4, 4 - 8s の帯域で地震波干渉法を適用し、本震の発生に伴う地震波速度変化とその空間分布を調べた。その結果、周期 1 - 2, 2 - 4s の帯域で、明瞭な地震波速度低下を確認した。トモグラフィ的手法で空間分布を調べたところ、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。レイリー波速度の分散性を考えると、浅部における約 5 % の S 波速度低下と微動から得られた 0.1 - 0.3 % 程度の速度低下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。この研究は、稠密かつ多点のデータを用いて地震波速度変化の詳細な空間分布を明らかにした点に大きな意義がある [高木, 2011]。

(c) 地震波干渉法についての理論的・数値的研究

昨年度の研究で、微動源が一様ランダムに分布する場合、微動の相互相関関数の時間微分は構造の不均質を反映したグリーン関数の反対称和と微動源の時間関数の自己相関関数との畳み込みで書かれることを、点的な速度不均質が空間に分布する媒質について一次のボルン近似を用いて証明した [Sato, 2010]。引き続き高次の散乱の影響について研究を進めたところ、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すことが出来た。これは、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を意味する。さらにこれを一般化し、微動の相互相関関数からグリーン関数を得ることと波動の散乱過程が光学定理を満たすこととが等価であることを証明することができた [Margerin and Sato, 2011]。この理論研究の成果は、微動源の分布に制限はあるものの、不均質構造に起因する散乱項を含んだグリーン関数を相互相関関数から得ることができることを保証するものである。

地震波干渉法が厳密に成り立つためには、エネルギー等分配が必要であることが理論的研究により指摘されている。しかし、現実において、エネルギー等分配がどの程度満たされているかは明らかではなかった。そこで我々は、自然地震の S コーダ波における水平動と上下動への振動エネルギーの分配比に着目した。防災科研 KiK-net の鉛直ボアホール観測記録を用いて、この比を計算したところ、S コーダ波部分においては定常値に収束することが分かった。またその比の周波数依存性を求め、検層で決められた水平成層構造における実体波と表面波のエネルギー等分配を仮定した理論モデリングとの比較を行った。観測と理論との一致はよく、自然地震の S コーダ波においてエネルギー等分配が成立していると考えてもよいことが明らかになった。これは地震波干渉法を S コーダ波に適用することの妥当性を支持するものである [Nakahara and Margerin, 2010]。

=====平成 23 年度の成果=====

Passive Image Interferometry 法を 2005 年福岡県西方沖地震の震源域における観測データに適用した。震源域から 50km 以内にある防災科研 Hi-net, F-net の 7 観測点 (図 A1 参照) における 2003 年から 2010 年の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。本震発生の前後の短期間だけでなく、8 年間にわたる長期間の解析を行った。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 (図 A2 参照)。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。2005 年 3 月 20 日の本震発生に伴う地震波速度の変化は、この年周変化成分により隠され、現在のところ検出できていない。今後、年周変化成分とその他の成分を分離する手法について検討する必要がある。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、あるいは地下水位の季節変化などによる可能性が考えられる。

(8) 平成 22 年度の成果に関連の深いもので、平成 22 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Anggono, T., 2011, Spatio-temporal changes in seismic velocity of Miyakejima volcano associated with the 2000 activity as inferred from ambient seismic noise analysis (雑微動解析による 2000 年三宅島火山活動にともなう火山体構造の時間変化), 東北大学博士論文。

Margerin, L., and H. Sato, 2011, Reconstruction of multiply-scattered arrivals from the cross-correlation of waves excited by random noise sources in a heterogeneous dissipative medium, *Wave Motion*, 48, 146-160.

Nakahara, H. and L. Margerin, 2010, A test of the equi-partition hypothesis for S-wave coda using borehole records of local earthquakes, Abstract of the Meeting of the Americas, S14A-02, Foz do Iguaçu, Brazil.

Sato, H., 2010, Retrieval of Green's function having coda waves from the cross-correlation function in a scattering medium illuminated by a randomly homogeneous distribution of noise sources on the basis of the first order Born approximation, *Geophys. J. Int.*, 180, 759-764, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04432.x.

高木涼太, 2011, 常時微動の相互相関解析に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震震源域およびその周辺域のレイリー波伝播速度とその時間変化に関する研究, 東北大学修士論文。

(9) 平成 23 年度実施計画の概要 :

引き続き、Passive Image Interferometry 法に基づき地下構造の時間変化を検出する解析システムを用いて、データ解析を行う。また地震波干渉法に関する理解を深めるための基礎研究も並行して行う。

(10) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

中原恒・松澤暢・佐藤春夫・他
他機関との共同研究の有無 : 無

(11) 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.geophys.tohoku.ac.jp
URL：http://www.zisin.geophys.tohoku.ac.jp/

(12) 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

電話：022-795-6533

FAX：022-795-6783

e-mail：naka@zisin.geophys.tohoku.ac.jp

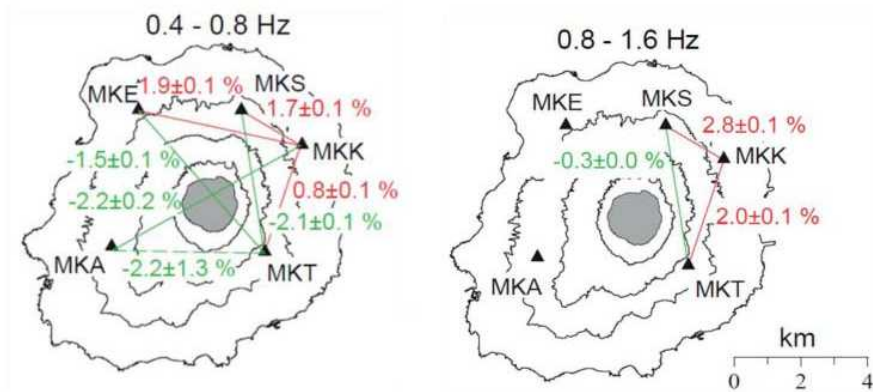


図 1

微動の相互相関解析により推定された 2000 年三宅島噴火を挟んだ期間に対する地震波速度の時間変化 (Anggono, 2011). 左が 0.4 - 0.8Hz, 右が 0.8 - 1.6Hz の結果. 赤色の経路が地震波速度上昇, 緑色の経路が地震波速度低下, 数字は変化量を示す.

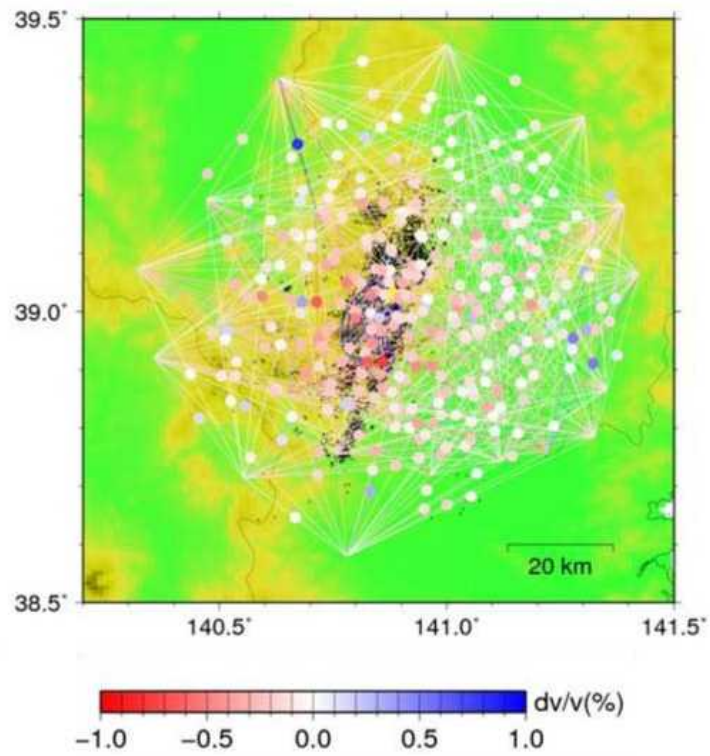


図 2

2008 年岩手宮城内陸地震に伴う周期 2-4 s の帯域におけるレイリー波速度変化の空間分布（高木，2011）。観測点間経路の線とその中点においた丸印の色で地震波変化を示す。赤色が地震波速度低下，青色が地震波速度上昇を示す。

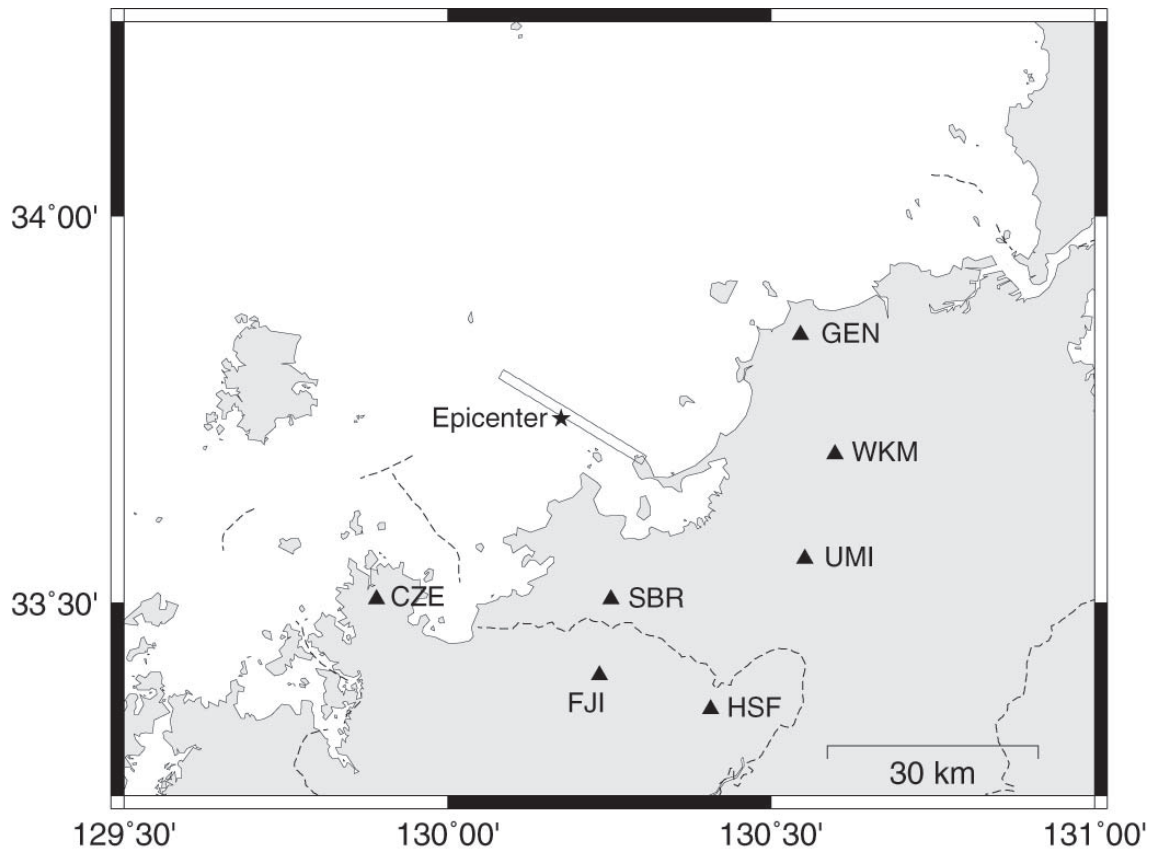


図 A1
 使用した観測点(▲)と震央(★)。

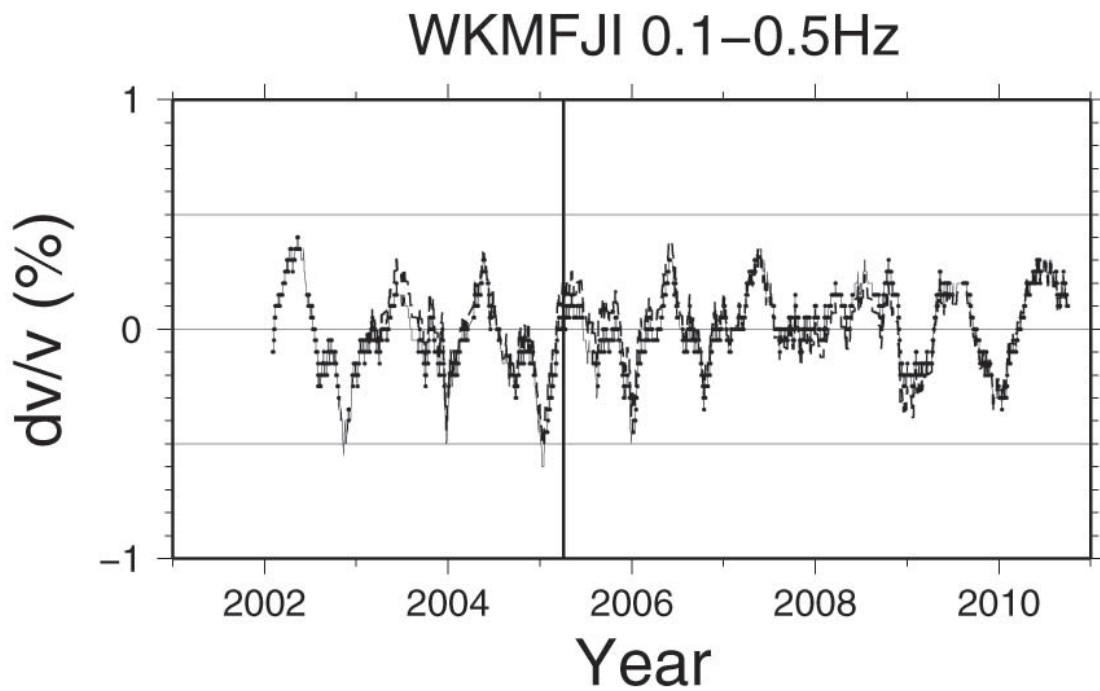


図 A2
 推定された地震波速度の時間変化の例(観測点 WKM-FJI 間, 0.1-0.5Hz)。縦実線は本震発生日(2005年3月20日)を示す。