

(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) 平成 21 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 22, 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既往の受動的モニタリング手法についての検討

今年度は、地震波の相関を用いて受動的に地下構造のモニタリングを行う手法であるコーダ波干渉法 [例えば Snieder et al.(2002)] や地震波干渉法 [例えば Campillo and Paul(2003), Wapenaar and Fokkema(2006)] について、文献調査を行い、利点と問題点を整理した。コーダ波干渉法は、相似地震や人工地震の繰り返し波形記録に対して、そのコーダ波部分の相互相関から媒質の時間変化を計測するものである。多重散乱波の特徴の一つである構造変化に対する感受性をうまく使った手法であるが、相似地震の発生を待つ必要があること、人工地震は高コストであることなどから、時間分解能を上げることが困難である。一方、地震波干渉法は、常時微動やコーダ波の相互相関や自己相関から、媒質のグリーン関数を受動的に合成する手法で、現在広く注目を集めている。特に常時微動を用いると時間方向に連続的なデータ解析が可能となる点は大きな魅力である。その一方で、適用限界や信頼性については未だ解明されていない部分も残る。

文献調査の結果、現在のところ、Passive Image Interferometry 法 [例えば Sens-Schoenfelder and Wegler(2006)] が、地下構造の時間変化を受動的かつ連続的に監視する上で最も有効であると考えられる。というのも、この手法は、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もので、コーダ波干渉法と地震波干渉法の両者の利点を組み合わせているからである。また実際に、地震発生に伴う震源域での構造の時間変化 [例えば Wegler and Sens-Schoenfelder(2007), Ohmi et al.(2008)] や火山噴火に伴う火山体構造の時間変化 [例えば Brenguier et al.(2008)] などが、この手法により検出されている。この手法により検出される地震波速度変化の精度は、0.1 %程度と考えられている。手法の適用にあたっては、微動の入射方向の等方性や広角性を担保すること、波動場の構成要素を理解することが望まれる。

(b) 波形相関を利用した受動的モニタリング手法のデータへの適用

次年度以降の研究計画の一部を先取りし、Passive Image Interferometry 法を 2004 年新潟県中越地震の震源域における観測データ (Mj6.8) に適用した [Wegler et al. (2009)]。震源域から 30km 以内にある防災科研 Hi-net, F-net の 6 観測点 (図 1 参照) の連続波形記録を用いて、本震発生の前後 2 カ月間にわたり、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、本震発生の直前には相関に見られるフェイズに変化は見られなかったが、本震発生に伴いフェイズの顕著な遅れを検出した。分析の結果、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 (例えば図 2 参照)。原因は特定できていないが、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砕による構造の弱体化が考えられる。

(c) 地震波干渉法についての理論的・数値的研究

地震波干渉法についての理解を深めるために理論的考察を行った。微動の相互相関から媒質を伝播する波動のグリーン関数を求める事が出来るようになったものの、実際には直達波の伝播速度の推定のみを用いられていることが多い。相互相関の直達波の後に続く波群をどのように理解したら良いかは、未だ明らかではない。デルタ関数的な速度不均質が空間に分布する減衰のない媒質を考えた場合、そのグリーン関数は直達波とそれに続くコーダ波から形成される。Sato[2009a] は、このような不均質媒質を取り囲むようにノイズ源を分布させた場合、相互相関の時間微分がグリーン関数の反対称和で表されることを、ボルン近似を用いて導いた。Sato[2010] は、減衰がある媒質中では、ノイズ源が空間的にランダム一様に分布する場合に、相互相関の時間微分がグリーン関数の反対称和で表されることを、ボルン近似を用いて導いた。さらに、Sato[2009b] は、速度不均質がランダム一様に分布する減衰のない媒質中において、一次散乱コーダ波の相互相関からグリーン関数の直達波成分を導出することが出来ることを示した。以上のように、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、そしてその場合のデータ解析方法が明らかになった。

(8) 平成 21 年度の成果に関連の深いもので、平成 21 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

Sato, H., 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, 2010.

Wegler, U., H. Nakahara, C. Sens-Schoenfelder, M. Korn, and K. Shiomi, Sudden drop of seismic velocity after the 2004 M-w 6.6 mid-Niigata earthquake, Japan, observed with Passive Image Interferometry, *J.*

Geophys. Res., 114, B06305, doi 10.1029/2008jb005869, 2009.

Sato, H., Green function retrieval from the CCF of coda waves in a scattering medium, Geophys. J. Int. , 179, 1580-1583 doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04398.x, 2009b.

Sato, H., Retrieval of Green's function having coda from the cross-correlation function in a scattering medium illuminated by surrounding noise sources on the basis of the first order Born approximation, Geophys. J. Int., 179, 408?412, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04296.x., 2009a.

(9) 平成 22 年度実施計画の概要 :

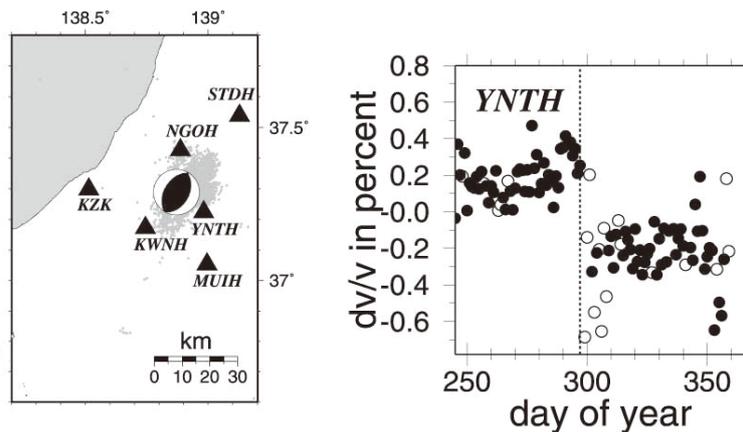
平成 21 年度の検討結果に基づき, 地下構造の時間変化を検出する手法として Passive Image Interferometry 法を採用する. ただし, 波形の振幅情報の規格化に関しては, いくつか異なる方法が存在するため, 適切な方法について検討を進める. 以上のようにして選ばれた手法に基づいて, 地下構造の時間変化を検出する解析システムを構築する. また地震波干渉法に関する理解を深めるための基礎研究も並行して行う.

(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



観測点分布と地震波速度変化の 1 例

左図 . 2004 年新潟県中越地震の本震のメカニズム解, 余震の分布 (灰色丸印), 構造の時間変化の検出に使用した 6 観測点 (黒三角印) .

右図 . YNTH 観測点における 2-8Hz の微動の自己相関に現れる位相の変化から計算された地震波速度の時間変化 . 横軸は日で, 破線 (297 日) が本震発生日を表す . 黒丸印は信頼度が高い結果, 白丸印は信頼度が低い結果を表す . 本震発生後に 0.3 % 程度地震波速度が低下している .

いずれも, Wegler et al. (2009) の図を一部改変 .