

( 1 ) 実施機関名：

京都大学防災研究所

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

地震波干渉法による構造変化の検出手法の開発

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 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

( 4 ) その他関連する建議の項目：

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

本計画では、地震波干渉法を応用して、地震波形連続記録の雑微動部分の自己相関関数 (ACF) の監視による地殻構造の時間変化の検出手法を確立し、大地震前後の地殻構造変化の有無の検出や、もしもそのような現象が存在する場合にはその原因を明らかにすることを目的とした研究を行う。

これまでの先行研究により、2 点間の雑微動の CCF はそれらの観測点間での擬似反射記録と解釈されることが示されており、これの応用で 1 点の雑微動の ACF は当該観測点直下の擬似反射記録であると解釈されることから 1 観測点の雑微動の ACF からその観測点下の構造が推定できるとされている。

そのため、本計画では、(1)ACF が地下構造のどのような情報を持っているかの検証と、(2)ACF に地震の前後で変化が認められる場合にはその原因を探る、ことの 2 点を目標とする。

(1)のためには、まず、すでに予備的な解析により、ACF の形状が時間的に安定していることが判明している微小地震定常観測点や、その中でも地震前後で ACF の形状が変化することが検出されている微小地震定常観測点を数点選び、周囲に高密度の臨時高感度地震観測アレイを設置して観測を行う。このデータを用い、雑微動部分の観測点間 CCF や各点の ACF を求めて比較考察することにより、ACF の持つ情報の評価を試みる。これにより、単独観測点の ACF により地殻構造を求める手法の有効性の評価を行う。その結果を援用して、(2)のテーマである、ACF が安定している点や地震に伴いそれが変化する観測点での地震波速度構造の推定法の検討とその評価、更には構造の時間変動要因の特定等を試みる。後者に関しては、構造の時間変化は応力・ひずみ状態の変化に起因することが先行研究により示唆されていることから、応力・ひずみ等にかかわる別種の観測量から得られる指標との比較検討も併せて行う。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

7-1. 平成 21 年度：

- ・ ACF 形状が安定している定常微小地震観測点の抽出

京都大学や他機関で運用している微小地震観測網のデータを解析して ACF の形状が時間的に安定している観測点を抽出する。予備的な成果により、数点の観測点についてはそのような傾向が見られることが判明しているが、さらに、例を増やす。

- ・ 過去のデータの再生と解析

いくつかの観測点を選び、過去 10 年程度に遡るデータの再生と解析を開始する。特に、ある程度以上の大きさの地震が発生した地域、時期を選んで解析を行う。なお、京大防災研に保管されているデータだけでは不十分な場合には、他機関に保管されているデータも借用して解析に資する。

・既存観測点近傍におけるアレイ地震観測とその解析

予備的な解析で ACF 形状が安定していることが判明している観測点の近傍に、地震計 4 台程度からなるアレイ観測網を設置し、半年程度のデータを取得する。得られたデータは順次解析し、観測点ごとの ACF のほか、観測点間の CCF など求め、解析結果の定量的な評価を進める。

7-2. 平成 22 年度～平成 24 年度：

・過去のデータの再生と解析

平成 21 年度までの解析に基づき選択した観測点の、過去 10 年程度またはそれ以上に遡るデータの再生と解析を継続する。

・既存観測点近傍におけるアレイ地震観測とその解析

平成 21 年度までの予備的な解析で ACF 形状が安定していることが判明している観測点を毎年 1 または 2 点選び、数か月程度のアレイ観測と得られたデータの解析を進める。

7-3. 平成 25 年度

・過去のデータの解析の総括

それまでに解析したデータについて、地震発生前後の地殻構造変化の検出の有無、特に先行して発生する現象の有無などの総括を行う。

( 7 ) 計画期間中 ( 平成 21 年度～25 年度 ) の成果の概要：

本計画では、単独微小地震観測点の雑微動の自己相関関数 (Autocorrelation function, ACF) や、複数観測点間の相互相関関数 (Cross Correlation function, CCF) を利用した、地下構造の時間変化検出の可能性について考察した。

平成 21 年度は、これまでの研究では雑微動の自己相関関数 (ACF) の位相のラグタイムの時間変化を考察していたのに対し、ACF の減衰定数 (ACF-Q) を考察の対象にした。ACF は、Claerbout(1968) 以来の地震波干渉法の立場からは、地下の反射面からの擬似反射波とみなされるが、最近の研究では、ある条件のもとでは地下の散乱体からの擬似散乱波とみなしてもよいという結果も得られている (Sato, 2009)。平成 21 年度は、これまでの、主に前者の立場に立った考察に加え、後者の立場から ACF の減衰定数の時間変化についての予備的な考察を行った。ACF の計算手法は、既出の結果 (Ohmi et al., 2008, EPS) と同様である。本報告では ACF の減衰定数 (ACF-Q) を考察の対象にする。ACF-Q は日々の ACF にコーダ Q の解析等に用いられる手法を援用して Q を求めたものである。

Fig.1a には予察に用いた、2007 年能登半島地震の震源域の観測点 (Hinet の N.TGIH 観測点) の ACF の形状の時間的な経過を示す (Ohmi et al., 2008 による)。Fig.1b には、これらの観測点の特定のフェイズのラグタイム、および、ACF-Q の時間変化を示す。ACF-Q の図において、緑のドットは、日々の Q を示し、赤の実線はそれらの 10 日間の移動平均を示している。これによると、Q は 2006 年から 2007 年いっぱいにかけて大きな変動を示すが、この変化はラグタイムの変化では明らかではない。一方、ラグタイムには、本震に伴う明瞭なオフセットが認められるが、この変化は Q では明らかではない。すなわち、雑微動の ACF の個別フェイズのラグタイムの時間変化の傾向と、ACF-Q のそれは必ずしも一致はしておらず、解析方法や解釈に検討の余地が残っている。前者は、ACF を擬似的な反射波とみなし、後者は散乱波とみなす立場であり、両者が別の量を観測している可能性もある。これらの量の性質を明らかにし、地殻活動の時間変化指標となり得るかを検討するためには、従来からの手法による反射法探査等の構造探査や、コーダ Q の解析等の結果と比較することが重要であると考えられた。

平成 22 年度には、これまでの ACF のみの解析に比較して安定した解が得られると考えられる、観測点間の CCF の解析を中心に試みた。従来の計画では、雑微動の自己相関関数 (ACF) を使用して、その監視による地殻構造の時間変化の検出を目指すことを目標としているが、ACF には個別観測点のノイズ環境等の影響が大きく表れるため、平成 22 年度は、試みとして観測点間の相互相関関数 (CCF)

の監視の可能性を探ったものである。雑微動部分の CCF を使う地殻構造の研究では、CCF に現れる Rayleigh 波の位相速度を用いるのが主流のひとつであるが、元来の地震波干渉法では、CCF は 2 点間の疑似反射記録であり、ここには実体波の反射波も含まれているはずである。地下の地震波反射面は、地震発生層との関連を指摘されていることから、この部分の監視を行うことは地震発生機構の解明に重要であり、これまでも能動的震源であるアクロス等を用いた時間変化の監視が試みられている。既往研究によれば、近畿地方を中心とする西南日本地域には、モホ面を始めとして、いくつかの地殻内・地殻下反射面の存在が報告されている。平成 22 年度は、近畿地方を対象地域として、地動信号の雑微動部分の相関解析により、これらの反射面からの信号の検出を試みた結果を報告する。解析には、短周期微小地震観測点の上下動成分連続記録データを用いた。データは 1 時間ごとのセグメントに分割し、0.5Hz-1Hz のバンドパスフィルタリング等の前処理ののち、観測点間の相互相関関数 (CCF) を求めた。その後、各観測点ペアにつき、最低 15 か月程度の相互相関関数をスタックして結果とした。解析結果のうち、主として Hi-net のボアホール観測点と他の観測点間の CCF には、Rayleigh 波の基本モード以外の信号が認められる。Fig.2 には解析例として地表観測点と他観測点間の CCF の例を示す。これらの点と他の観測点の間の CCF には、Rayleigh 波の基本モード以外の、明瞭な信号が認められ、特に、2000m 超の深層観測点と観測点間距離 100km 程度までの CCF には、明瞭な、反射波と思われる信号が認められる。

本解析により、雑微動の相関解析により、地殻内反射面やモホ面からの反射信号の検出が可能であることが明らかとなった。これらの信号の時間変化の監視により、地震発生層の挙動を監視できる可能性があるが、今回は 15 か月間のデータのスタックによる結果であるため、時間変化の監視のためには、時間分解能を向上させる等が今後の課題となる。

平成 23 年度は、東北地方太平洋沖地震によりもたらされた体積ひずみ変化の検出を試みた。この地震による体積ひずみ変化は、これまでに解析を行った 2007 年能登半島沖地震や同中越沖地震のそれに比較して桁違いに大きく、かつ広範囲にわたっている。これが雑微動の ACF や CCF の性状に地震前後で変化を与えたかどうかの解析を行った。これまでの結果と同様、地震後に ACF や CCF の性状が変化している観測点が認められる。CCF については、1Hz-2Hz 帯域と、0.1Hz-1Hz 帯域の 2 種類での調査を、ACF については、2Hz-10Hz 帯域での調査を行った。今回は、強震動を伴わなかった地域で、ひずみ変化による CCF / ACF 形状の変化がみられるかどうか重要なポイントなので、強震動に見舞われた地域として東北地方太平洋沿岸を、そうではない地域として中部地方を選び、それぞれで CCF / ACF を解析した。結果によると、CCF については、東北地方太平洋沿岸の観測点ペアで、特に 0.1Hz-1.0Hz 帯域のものに、地震後の速度変化がみられるペアが認められるが、例外も存在する。短周期の 0.5Hz-1.0Hz の CCF については、ラグタイムの増減についての系統的なパターンは認めがたかった。また、中部地方の CCF については、両帯域とも、ラグタイム増減の系統的パターンは見られなかった。これは、CCF の形状変化が、従前の研究同様、強震動によりもたらされた可能性を示唆しており、ひずみ変化による速度構造変化を CCF で直接的に検出することの困難さを示唆しているかもしれない。一方、ACF については、東北地方と中部地方の双方で、明瞭な速度低下を示す観測点が存在することが明らかとなった。また、東北地方と中部地方では、一旦変化したラグタイムが回復するのに要する緩和時間にも差があるように見受けられた。CCF では検出できなかった構造変化が ACF では可能であるひとつの解釈は、震源域から遠い地域の ACF の場合、ひずみ変化による直接的な構造変化を示しているのではなく、従来からひずみ変化に敏感であることが報告されている地下水位等の変化が、ACF に現れているのではないかというものである。これは、Savage and Ohmi (2010, AGU Fall Meeting) で ACF と地下水位が同様の時間変化を示す事例が報告されている。ACF は観測点近傍の変化を反映しやすく、局所的な地下水変化等に影響されやすいと考えられるのに対し、CCF は基線全体の平均値を反映するため、変化量が小さく現れるということがあるかもしれない。

平成 24 年度および 25 年度には、雑微動の自己相関関数 (ACF) や相互相関関数 (CCF) を使用して地震波速度構造の時間変化の定量的な推定を行う際に必要となるデータ処理手法についての再考察を、2007 年能登半島沖地震震源近傍のデータを用いて行った。2007 年能登半島沖地震の震源域における、

本震発生に伴う地震波速度構造変化については、すでに Ohmi et al. (2008, Earth Planets Space) に報告があるが、この報告は定性的な解析にとどまっている。この地震による地下構造変化を定量的に見積もるために、データの処理手法、とくに、雑微動データの前処理手法の詳細な検討を行った。

雑微動データの前処理手法としては、Bensen et al. (2007) に代表される、波形データに one-bit 化またはその応用手法を施したのち周波数領域でスペクトルのホワイトニングを行うもの、ならびに、Wegler et al. (2009) に代表される、波形データにある閾値を設定し、その閾値以上の振幅を持つ部分にはゼロ・フィルすることにより、地震等の deterministic な信号の影響を取り除くという手法がある。ここでは、one-bit 化または類似手法の有無、スペクトルホワイトニングの有無、のそれぞれの影響を調べた。その結果、one-bit 化的手法 (pure な one-bit 化や Bensen et al., 2007 の Running absolute mean normalization など) の有無による差異に比較して、スペクトルホワイトニングの有無が結果へもたらす影響の方が大きいことがわかった。本来抽出されるべき、波形の時間変化に相当する部分が、スペクトルのホワイトニングによりマスクされる影響が無視できないことによると思われる。そのため、今回はスペクトルホワイトニング手法は使用しないこととした。

さらに、市街地近郊の観測点の利用時に限らず、雑微動データのスペクトルには特定の周波数のラインスペクトルがみられることがあり、これが特に ACF の推定精度を低下させる。スペクトルホワイトニングを施す場合には、ラインスペクトルの影響も軽減できるが、それを適用しない場合には対策を別途検討する必要がある。そのため、今回の解析では、Wegler et al. (2009) 等のゼロ・フィル手法にスペクトル中のラインスペクトルを軽減する手法を組み合わせたものを使用して解析を行った。また、観測点間基線の Green's Function は、これまで CCF を用いて評価してきたが、今回は、CCF よりも安定した結果が得られると言われている、Deconvolution 法により求めた。

これらの手法による解析結果によれば、震央から 20km ~ 40km 程度のまでの観測点の ACF は、最大 1.5% 程度の速度低下を示し (Fig3a)、それは深さとともに小さくなる傾向を示す。これに対し、震源直上の観測点では、浅部で 3.5% 程度、深部ではさらに大きな値を示す。観測点間の基線については、震源域をサンプルする基線には最大 1.8% 程度の速度低下が見られた (Fig3b)。これらの結果を考察すると以下ようになる。震源域から離れた観測点については、ACF による速度低下は浅部の方が大きいことから、これらは強震動によりもたらされた可能性が高い。これに対し、震源断層直上では、深部の速度低下がより大きいことが示唆される結果となり、流体の注入等、強震動以外の原因による深部の速度低下がもたらされた可能性がある。また、観測点間 GF による速度変化は、考察している基線の平均的な速度変化であると考えられることから、震源域をサンプルする基線の CCF で見られる速度変化が ACF のそれより小さいことは、大きな速度低下を起こした領域が、震源域近傍に極在していることを示唆している。また、ACF の時間変化からは、この震源域近傍の速度低下は、本震発生直後にもたらされたことが推測される。成果の論文は執筆中であるが、平成 25 年度中に発表することができなかったことを反省している。

5 年間の成果として、地震の震源域のように、破壊を伴った領域の地震波速度構造の変化は本手法で比較的容易に捕捉することができるが、ひずみ変化に伴って期待される速度変化を捉えるのは困難を伴うように思われる。これは、地震の前兆である応力変化やそれに伴うひずみ変化の捕捉に本手法を適用することの難しさを示唆しているが、直接のひずみ変化等でなく、それに伴う地下水位変化等を捕捉できる可能性は残っており、今後の検討課題としたい。

(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) :

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

大見士朗、加藤護、平原和朗、3 人  
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：京都大学防災研究所地震防災研究部門  
電話：0774-38-4236  
e-mail：ohmi@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp  
URL：

( 11 ) この研究課題 ( または観測項目 ) の連絡担当者

氏名：大見士朗

所属：京都大学防災研究所地震防災研究部門

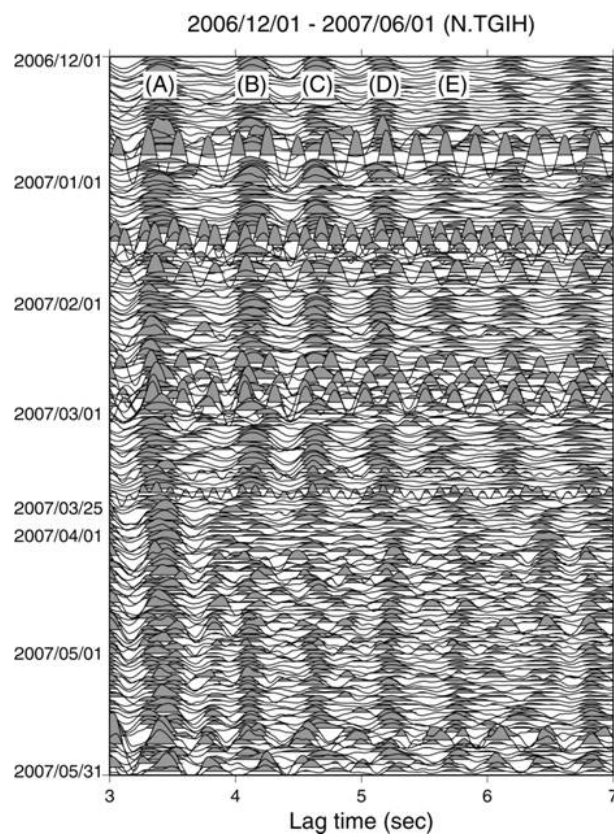


Fig1a: 2007 年能登半島地震震源域の雑微動 ACF の位相の時間変化例

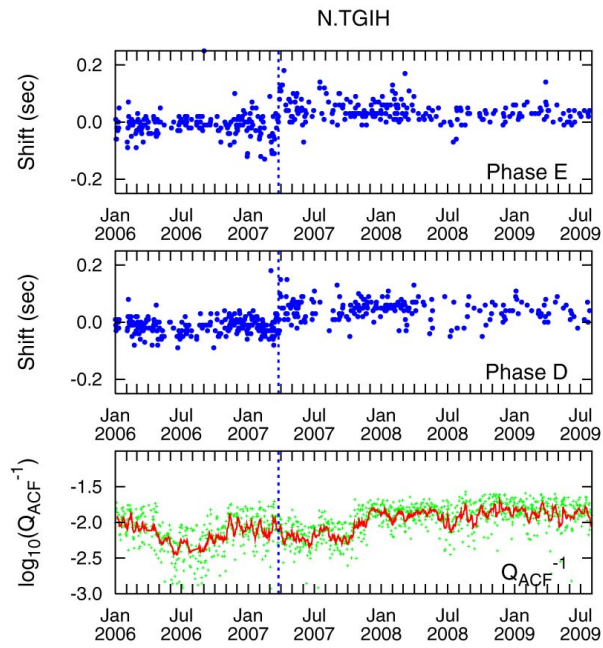


Fig1b: 2007 年能登半島地震震源域の雑微動 ACF の特定の位相および減衰定数の時間変化例

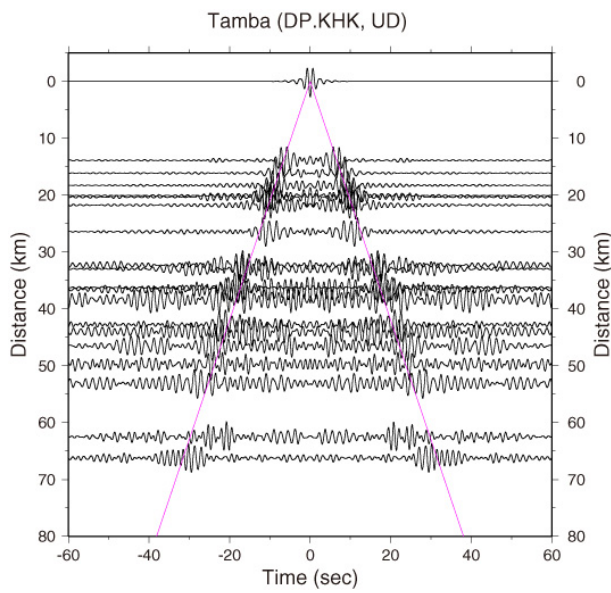


Fig2: 近畿地方の地表観測点と他観測点間の CCF の例

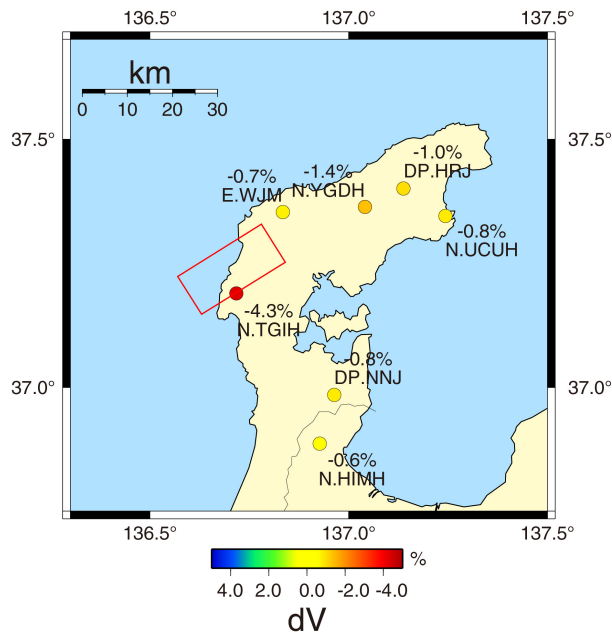


Fig3a: 2007 年能登半島地震震源域周辺観測点の ACF にみられた地震時の速度低下の分布

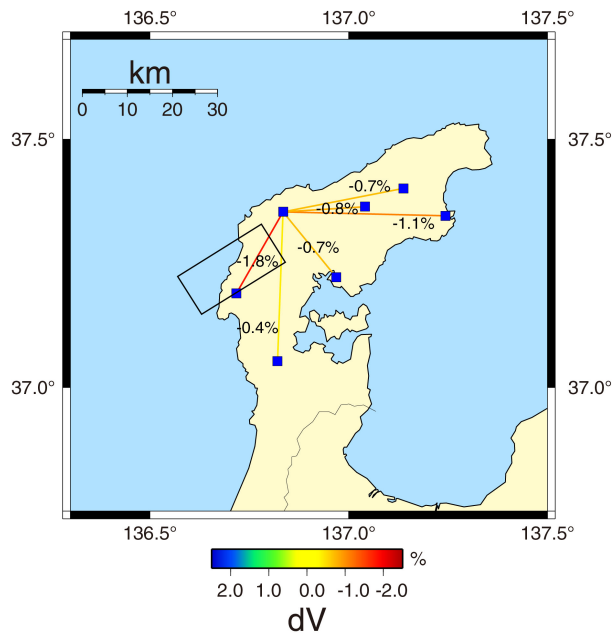


Fig3b: 2007 年能登半島地震震源域周辺観測点間基線の Green 関数にみられた地震時の速度低下の分布