

# 科学研究費補助金研究成果報告書

平成21年 3月31日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2007～2008

課題番号：19686053

研究課題名（和文） 地震波干渉法による都市型ノイズを利用した地中探査法の開発

研究課題名（英文） Underground survey with seismic interferometry using urban noise

研究代表者

尾西 恭亮（ONISHI KYOSUKE）

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20402969

研究成果の概要：

都市型ノイズを用いた地震波干渉法の探査手法を検討した。地下鉄直上に測線を設定することにより、地震波干渉法が利用でき、地下構造イメージングが可能であることを確認した。また、都市型ノイズを地震波干渉法で利用する際には、S波成分の利用が有効であることを確かめた。橋梁部の交通振動を用いた地震波干渉法試験探査を行い、通常の探査と同様な褶曲構造の検出に成功し、都市型ノイズを用いた地震波干渉法の有効性が確かめられた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2008年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
総計	19,300,000	5,790,000	25,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学，地球・資源システム工学

キーワード：地下構造調査，物理探査，地震波干渉法，都市型ノイズ，S波反射法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 都市部では交通や機械振動が卓越しているため、人口地震探査による地下調査を行うことが困難である。このため、都市域では活断層調査が不十分となっている。

(2) 近年、地震波干渉法という新しい地下探査手法が注目されている。地震波干渉法は、能動的に発生させた人工地震波を用いて地下構造をイメージングする既存の手法と異なり、地下を伝播する様々な震動を利用して地下の地震波の反射構造をイメージングする手法である。理論的には確証され、シミュレーション等でも有効性が検証されているが、実際の地下構造のイメージングには、

様々な問題から完全に実用化には至っていない。

## 2. 研究の目的

(1) 都市型ノイズを利用した地震波干渉法の実証試験を行う。地表面に特有のノイズが多く、通常の反射法地震探査の適用が困難な都市域において、逆にそのノイズを利用して地下イメージングを行う手法を開発し、都市域の活断層調査の有効な手法を提供する。

(2) 都市型ノイズを利用した地震波干渉法の有効なデータ取得方法を検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーションにより、地震波干渉法が有効に働く条件を検討する。

(2) 実地試験により観測条件や解析手法の適用を図り、都市型ノイズを用いた地震波干渉法の有効性を検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 地中ホワイトノイズ震源

図1の赤点で示すように、地中の様々な地点に震源が発生する条件でシミュレーションを行った。均質無限媒体内の、水平方向1,000~7,000m、深度方向500~800mにランダムに201箇所震源を設定した。震源波形には互いに無相関なホワイトノイズを与え、地表部の水平位置2,600~5,400mに40m間隔で計71受振点で鉛直方向の粒子速度を30分間記録した。図2は30分間の透過波記録のうち、3.0秒間分を取り出した記録である。

透過波記録の中央( $x=4,000\text{m}$ )のトレースと他のすべてのトレースとの相互相関を取り、その結果からさらに振幅の符号を逆にし、因果律を満たす部分を取り出して合成反射波記録を得た。1分間、5分間、30分間の透過波記録から得られた合成反射波記録をそれぞれ図3中に左から順に示す。また、地表 $x=4,000\text{m}$ に応力(リッカーウェーブレット,  $f_{\text{peak}}=15\text{Hz}$ )を与え、地表において鉛直方向の粒子速度を観測した反射波記録を得た図3中の最も右の位置に示す。1分間の観測による合成反射波記録と反射波記録を比較すると、合成記録において反射波記録と同様のイベントはわずかに認められるが、他に強い振幅の波が多くあり、ノイズが非常に大きい記録になっている。これに比べ5分間の観測による合成反射波記録では、ノイズが打ち消し合い反射イベントが顕著に現れてきている。30分間の観測による合成反射波記録ではさらにS/N比の高い記録になり、反射波記録と同様の反射波、多重反射がはっきりと認められる。

本シミュレーションから、ランダムに配置したホワイトノイズ震源による透過波記録に対して相互相関を取る操作を行うと、反射波記録を合成できることが確認された。このとき透過波を長時間観測することにより、S/N比の高い合成記録が得られることがわかった。これは、長時間の観測では、地表や地層境界で反射を繰り返した数多くの波を記録でき、相関を持つ部分がより多くなること、また、長時間ホワイトノイズの相互相関を取ることでノイズが小さくなることが理由であると考えられる。

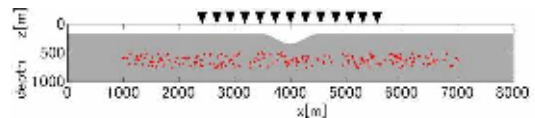


図1 二次元向斜構造モデル

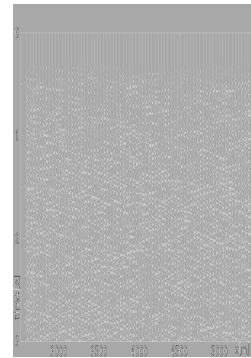


図2 観測記録

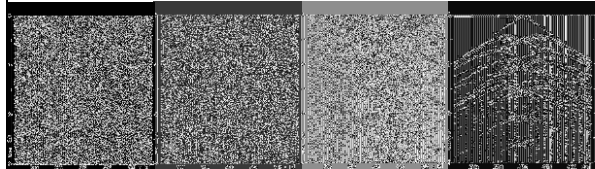


図3 相互相関処理により合成されたショット記録と通常の反射波記録

#### (2) 地中点震源

地中に単一の点震源が存在する場合について、地下構造イメージングの検討を行った。先程と同様の二次元向斜構造モデルに対し、震源関数はピーク周波数25Hzのリッカーウェーブレットを用い、それぞれの震源からの伝播波動を地表の受振点で観測する。地中震源の位置は、図4の第二層左側( $z=3,000\text{m}$ ,  $z=500\text{m}$ )、第二層中央( $x=4,000\text{m}$ ,  $z=500\text{m}$ )、第一層中央( $x=4,000\text{m}$ ,  $z=200\text{m}$ )の三つの状況を考えた。

それぞれの震源からの震動を地表で観測した真の反射記録を図5最上段に示す。これに対し、相互相関処理を行い受振点の数だけの合成ショット記録を計算したものを図5の2~4段目に示す。それぞれの図は、全合成記録のうち $x=3,000\text{m}$ (青)、 $x=4,000\text{m}$ (赤)、 $x=5,000\text{m}$ (緑)の位置にある受振器位置に対するショット記録である。地中の震源が一つの場合には、ゴースト反射波が多く含まれ、地表と境界面の反射波が無い或いは弱いために、合成ショット記録上の反射波が正確な位置に再現されておらず、見かけ上真の反射波記録とは異なっている。また、震源が地層境界面より下にある場合には、上にある場合に比べて繰り返すゴースト反射波が多く存在する。これは、境界からの反射波と直接波の干渉によって生じるものである。震源が、受振器群に対して左よりに存在する場合に

は、領域を右方向に向かう波が卓越しているため、波動伝播の指向性が合成記録にも大きく影響を及ぼしているのがわかる。ここで用いたモデルでは、各層の媒質は均質であり、地表面形状がフラットであるので、一度領域の側方へ伝播した波は無遠慮へと透過していく。現実には、地層内の不均質性や、複雑な地表面形状、地下の構造変化により、地下で複雑な波動場が存在すると期待される。真の反射波記録に近い波形記録を合成するためには、あらゆる方向からの波の影響を含む観測記録が望ましい。

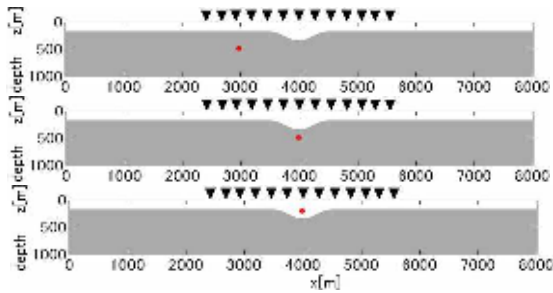


図4 二次元向斜構造モデル ● : 震源, ▼ : 受振器

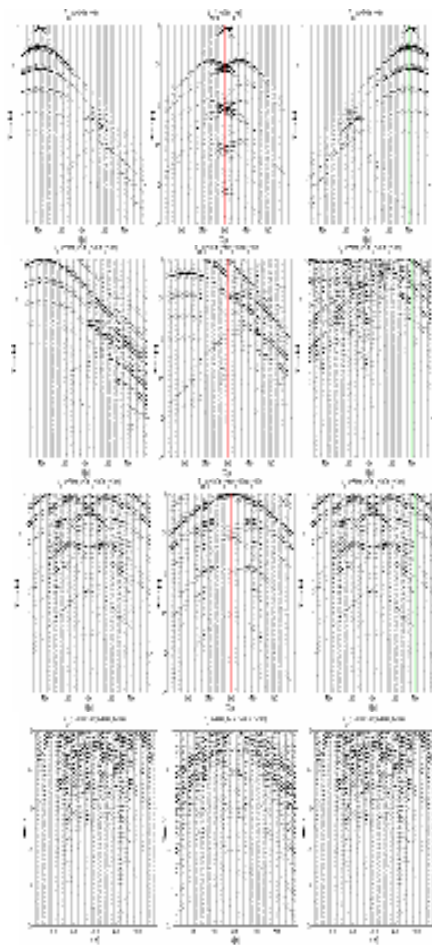


図5 真の反射記録と合成反射記録の対比

### (3) 自然地震による地震波干渉法

世界でも稀に見る地震多発地域である日本において、自然地震は身近な雑振動の一つである。自然地震の測定記録から反射法地震探査の記録が合成できれば、地震発生直後の震源域付近での余震測定により速報的な震源域の反射断面を得ることが可能となる。また、広範囲に分布する地震観測網で収録された地震データを用いることで、通常的人工震源による反射法地震探査の測定では不可能とされる深部構造の把握が可能となる。

平成19年(2007年)能登半島地震は北緯37度13.2分東経136度41.1分において深度11kmを震源として発生し、最大震度6強を記録したM6.9の地震である。3月30日~4月2日にかけて、震源付近の道路沿いに展開した南南西-北北東方向の約1.5kmの測線上に、鉛直成分2Hz型地震計を10m間隔で156ch設置し、サンプリング間隔1msの連続測定により、4日間にわたって累計約30時間の測定記録を取得した。

4日間の観測記録から、初動振幅比を判定基準に用いたルーチンを適用して余震記録のみを切り出した結果、1ファイルあたりの測定時間長を20秒として、合計819ファイルの余震記録が得られた。切り出した余震記録の例を図6に示す。観測記録からは、初動到達時刻に差が認められることから測線に対する震源の方位が推定できる(図6左)ほか、P波初動及びS波が明瞭に確認できる(図6右)記録が観測された。本データ処理では、測定期間中最も余震活動が活発であった3月30日に取得された420ファイルを用いて地震波干渉法の処理を実施した。

不良トレースを除去した後、全てのファイルに対して相互相関処理を行い、足し合わせた擬似ショット記録を図7に示す。記録の周波数範囲は2-20Hzであった。擬似ショット記録上では、全てのトレースにおいて反射波を確認することは困難であるが、仮想震源位置近傍のトレースで1.5~2秒付近に連続した反射波が確認できる(図7中の矢印)。連続した反射波は、南南西側(ch1側)を仮想震源とするショット記録では明瞭であり、北北東側(ch156側)を震源とするショット記録ではやや不鮮明となる。これは、実際の余震活動の震源位置が測線の南側(ch1側)に集中していることによるものと考えられる。また本解析に用いた余震記録の初動の傾きから、使用した地震の震源位置は南西側が多いことが確認された。

得られた擬似ショット記録に対して、CMPソート、NMO補正、静補正、CMP重合処理などの通常の反射法地震探査の処理を施し、得られた反射深度断面を図8に示す。深度断面上には、深度3000mより浅部に反射面がいくつも認められる。北陸地方土木地質図(1990)

によると、調査地域構造は上盤に花崗岩・火山岩類、下盤に堆積岩類が分布するとされており、図中矢印で示した明瞭な反射面はこの火山岩類と堆積岩類の構造境界面に対応したものと推定される。

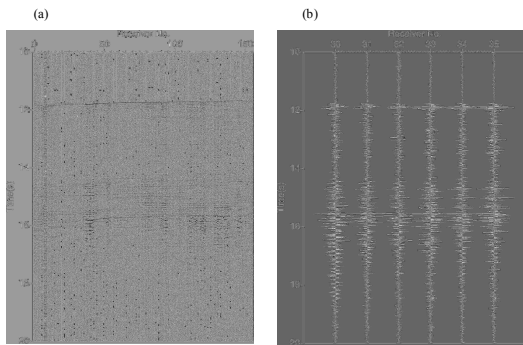


図 6 能登半島地震の余震記録例 (左図：全チャンネル (1-156)，右図 6 チャンネル分 (30-35))

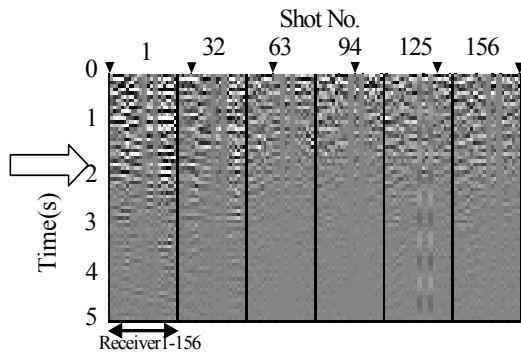


図 7 相互相関処理後の疑似ショット記録

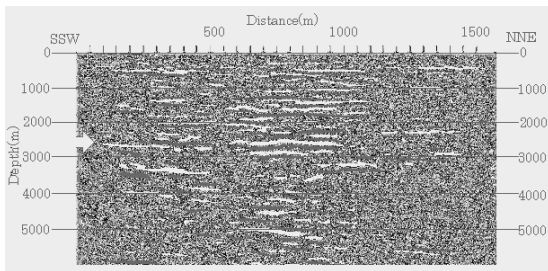


図 8 深度マイグレーション後断面

#### (4) 地下鉄震源による地震波干渉法

都市部において地下鉄の走行振動を利用して地震波干渉法の適用ができれば、都市域での地盤調査への適用が可能となる。京都市の鴨川沿い、京阪電車が地下を通る地点の直上で測定を行った。鴨川沿いの地下鉄の深さは比較的浅く、深さ 30m 程度である。ここで、3 成分受振器による 8 時間程度の測定を行い、疑似ショット記録を構成した。(図 9)

得られた疑似ショット記録からフィルタ処理や CMP による重合を行い、地下構造断面を得た。水平成分の波には S 波の成分を多く

含むため、300m/s で重合している。30m 付近に構造を見ることができる。この深さは、さきほどの人工地表震源のショット記録で見られた反射波の反射点の深さと一致するため、正しい構造を反映していると言える。また、電車を 20 本(約 1 時間分)、60 本(約 3 時間分)、100 本(約 5 時間分)、176 本(約 8 時間分)として疑似ショット記録を重合して比較すると、重合数を増やすとともにノイズが軽減されてくることが確認できた。重合断面を図 10 に示す。

水平成分の波による疑似ショット記録は、人工震源を用いた重合断面と比較しても遜色なく、電車の走行雑振動によって S 波反射記録が再現できることが分かった。

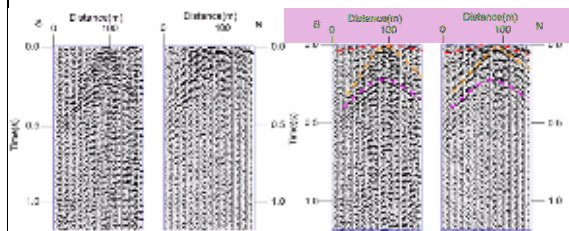


図 9 疑似ショット記録

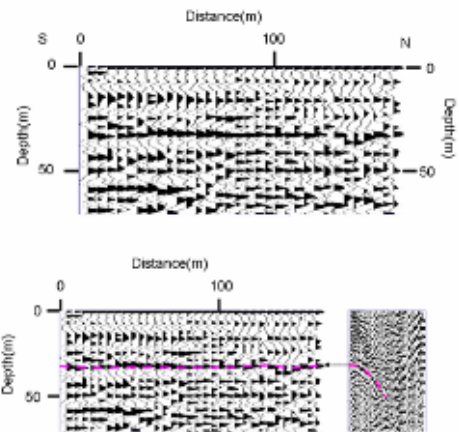


図 10 重合断面

#### (5) S 波成分の観測による地震波干渉法

最後に、群馬県の利根川支流神流川河川敷で実証試験を行った。深谷断層系の神川断層を横断する測線を設定した。測線を、新幹線、在来線、高速道路、国道が河川橋にて横断しており(図 11)、都市型の交通環境ノイズが卓越している。地下鉄震源を用いた解析結果により、都市型環境ノイズを利用した地震波干渉法には、卓越する S 波の利用が望ましいと判断されたため、受振は主に S 波成分を記録した。また、約 100m ごとに、3 成分振動も記録した。測線長は 2230m とした。また、横断測線を 3 測線および平行測線を 2 測線設けた。全区間におよび 10m 間隔で受振を行い、

受振点数は 300 点となった。

地震波干渉法による地下構造イメージング結果を図 12 に示す。解析には 10 時間分の観測記録を用いた。CMP400~800m 区間において、南西方向から北東方向に地層が落ち込んでいる様子が認められる。これは、推定される深谷断層の褶曲部に相当すると考えられる。本結果により、地下断面を捉えることに成功し、都市型ノイズを利用した反射法地震探査の実現性が確かめられた。

また、通常の S 波反射法探査も合わせて行った。地震波干渉法と同一区間の結果断面を図 13 に示す。通常の反射法記録の方がより明瞭に地層構造を捉えており、地震波干渉法により、通常の反射法と同等の探査断面を得るにはさらなる工夫を要する。

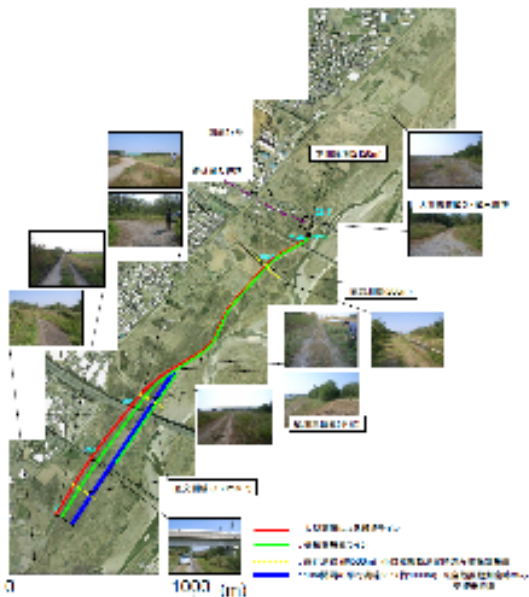


図 11 測線配置図

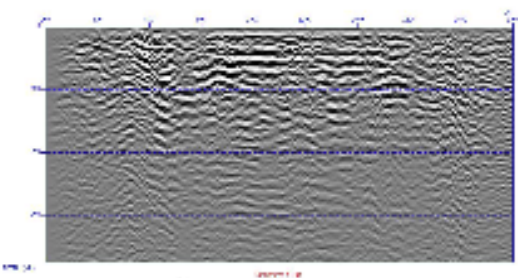


図 12 地震波干渉法による重合断面

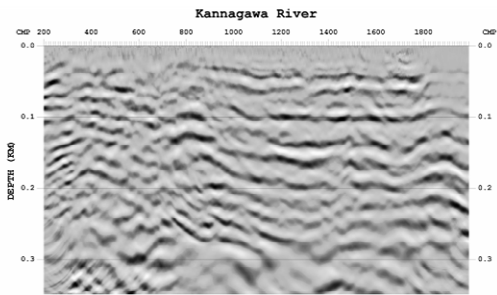


図 13 通常の S 波反射法による重合断面

#### (6) まとめ

本研究では、反射法地震探査の都市域の探査への適用を検討し、都市型ノイズを利用した手法に関して、実証試験を中心に行った。地表面に特有のノイズが多く、通常の反射法地震探査の適用が困難な都市域において、逆にそのノイズを利用して地下イメージングを行う手法の開発を行った。

地震波干渉法では、探査対象域を均一に取り囲むように震源分布が存在していることが重要である。都市型ノイズの震動発生箇所は、特に交通振動の場合は震源分布に偏りが生じるため、測線決定に注意する必要がある。

また、都市型ノイズのひとつひとつの振動は非常に小さいため、S/N 比の高い擬似ショット記録を得るためには、測定時間を十分に長くとることが重要となる。本試験探査により、10 時間程度でもある程度の地下構造イメージングが可能であることが判明したため、現実的な計測時間で探査可能であることが確認された。

また、震源となる都市型ノイズの振動エネルギーに対し、観測ノイズとなる測線近傍の地表振動が大きいことが問題と考えられていたが、長時間観測による標準化により、十分な S/N が確保されることが確認された。

さらに、本研究により、地震波干渉法には S 波成分の利用が有効であることが確かめられた。地震波干渉法は減衰が大きな多重反射波の効果が大きいと考えられ、震幅の大きな S 波の利用が有効であると考えられる。特に都市型ノイズは S 波が卓越している。

本研究により、都市型ノイズを用いた地震波干渉法の有効性が確かめられた。しかし、通常の反射法と比較すると、重合断面の反射構造の明瞭さにはまだ隔たりが大きい。今後は、干渉処理による信号抽出方法や、S/N を悪化させる信号の選別方法などを検討し、解像度の向上を実現することが重要である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 白石和也, 尾西恭亮, 伊藤俊一郎, 山中義彰, 相澤隆生, 松岡俊文, 地震波干渉法による地下構造イメージング技術の実用化にむけた実験的研究, 物理探査, 61, 101-110, 2008, 査読有
- ② 相澤隆生, 山中義彰, 伊藤俊一郎, 木村俊則, 尾西恭亮, 松岡俊文, フィールドでの観測実データを用いた地震波干渉法の適用条件に関する研究, 物理探査, 61, 121-132, 2008, 査読有

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

尾西 恭亮 (ONISHI KYOSUKE)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20402969