

戦-2 活断層周辺の地下構造調査手法および地盤モデル作成手法に関する調査 (2)

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 15-平 20

担当チーム：技術推進本部 特命事項担当

研究担当者：稲崎富士

【要旨】

道路や河川施設などの線形構造物が内陸活断層と交差して構築されている場合、地震の被害想定では地震動やそれに伴う液状化などの地盤被害に加えて、断層の変位そのものによる構造物の被害についても検討する必要がある。断層変位は主断層部だけでなく断層帯内の副断層にも分配される。しかし断層変位のすべてが地表に明瞭にあらわれるわけではなく、特に沖積低地や人工改変が進んだ市街地などでは変位地形を識別できないことが従来の変動地形調査や群列ボーリング調査の限界として指摘されていた。これに対しランドストリーマーを用いた高分解能反射法探査では、表層部 100m 程度までの浅部地盤の詳細な変形構造をイメージングすることができる。そこで同ツールを用いた活断層調査を実施し、適用性について検討した。研究期間中、活断層の存在が判明している箇所あるいはその存在が推定されている箇所等合計 7 箇所において調査実験を実施した。その結果、同ツールを用いた高分解能反射法探査によって活断層周辺の浅部変形構造を詳細に把握できることが実証された。特に主断層部だけでなく、前縁副断層や後方低角衝上断層に分配された断層変形活動イベントを識別可能であることが明らかになり、同手法が内陸活断層の全体的な活動性評価に不可欠なデータを提供できることが裏付けられた。今後、高速道路や河川堤防、鉄道などの重要線形構造物の防災機能向上や維持管理に貢献が期待できる。

キーワード：内陸活断層、浅部変形構造、ランドストリーマー、反射法地震探査。

1. はじめに

2007 年中越沖地震や 2008 年岩手宮城内陸地震では、最大震度 6 強、最大加速度で 2000gal を超える強震動が観測されたが、それに加えて大規模な地盤破壊が発生し建造物に甚大な被害を与えたことが特徴的であった。我が国では陸域だけでも 2,000 本以上の活断層が記載されているが、その活動によって地表にまで断層変位が達した場合、同様な地盤破壊が広域的に発生することが懸念される。高速道路や鉄道などの線状構造物は、その機能保持のために内陸活断層と交差することが余儀なくされるので、内陸活断層の活動による地盤破壊の影響を受ける確率が高いと想定される。実際、これまで記載されている内陸活断層との位置関係を調べたところ、高速道路等で 131 箇所、主要河川・堤防では 92 箇所、鉄道では 224 箇所で見交差していた。これらの構造物が損壊すると、直接的な被害だけでなく、二次災害の発生、あるいは災害復旧に不可欠なインフラ機能障害による間接的な影響も発生しうる。2007 年能登半島地震や 2004 年中越地震の際には、道路・鉄道が寸断されて山間集落が孤立したり、救援物資の移送に支

障をきたした事例が多く出来た。従来の地震による被害想定では、強震動による構造物のひずみ破壊が対象とされてきたが、活断層近傍では地盤破壊の影響も評価することが必要とされる。

近年、空中写真判読と群列ボーリング、トレンチ調査を組み合わせることによって微細な断層変位地形を識別する手順が確立され、その成果は新たな活断層の発見やセグメントの詳細区分として提供されている。しかし断層変位のすべてが地表に明瞭に現われるわけではなく、特に沖積低地や人工改変が進んだ市街地などでは変位地形を識別できないことが変動地形学の限界として指摘されていた。

本研究では、社会基盤施設の防災・耐震機能向上に資することを目的として、内陸活断層周辺の浅部地盤構造調査手法の開発を目標とした。特に活動度が高く縦ずれ成分が卓越する逆断層を対象に、断層帯浅部の変形構造を把握することを目的とし、独自に開発したランドストリーマーツールを利用した高分解能浅層反射法探査の適用性を検討した。その結果、同手法によって断層帯浅部の変形構造を詳細にイメージングできることがわかった。

2. 検討調査手法概要

探査には独自に開発した反射探査ツールであるランドストリーマー（稲崎，1992）を使用した。使用したランドストリーマーは、舗装路面上においても高分解能 S 波反射法探査が可能になるように考案・設計されており、従来は別々に設置・展開していた地震計アレイと信号ケーブルを一体化し、一度に展開・移動できるようにした現場計測ツールである（図-1）。反射法探査では、ある起振点での測定が終了すると震源と地震計類一式を一受振点間隔分次の展開まで移動し収録範囲をオーバーラップさせて測定を繰り返すという測定方法を基本的に採用している。すなわち、多数の地震計をあらかじめ測線上に展開しておき、測定区間に応じて震源・地震計類を移動させながら観測する、という手順である。しかしこのためには多量の地震計を準備し、それを測線上に設置し、信号ケーブルと接続し、さらに回収・移動する、という手間のかかる作業を必要としていた。これに対し開発したランドストリーマーツールでは、最小限の地震計類を信号ケーブルと結線するだけでよく、また地面に地震計を固定設置する必要もない。それにより初期投資の軽減化と現場作業の効率化を達成することが可能になった。

開発したランドストリーマーツールの特長の一つは、地震計類の設置方法にある。従来の探査ではスパイク付きの地震計を使用し、地中に突き刺して固定していたが、ランドストリーマーでは板状のプレートを通じて地面に接している。スパイク等で固着されてはいないので、舗装路面上で容易に移動展開させることができる。このような設置形式でも、舗装路面の場合にはスパイク固定方式に比べて遜色のない波形データを取得することができる。ただし、

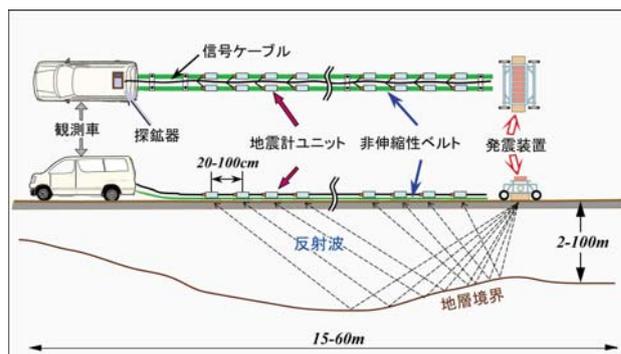


図-1 ランドストリーマーツールの概要（稲崎，1997）

風や車両通行振動の影響を受けやすくなるため、静穏な環境下での測定が望ましい。なお地震計ユニットは牽引部材である布ベルト、あるいはロープ、ステンレスワイヤ等に等間隔で装着されており、等間隔を保持したまま牽引・移動が可能となる。

これまでに開発・改良を加えたランドストリーマーツールを表-1 に掲げる。地震計間隔は最小の20cm から2m まで6種類あり、探査対象とする活断層の構造深度に合わせて使い分けている。浅部を対象とした反射法探査におけるイメージング領域は、地震計間隔の5倍程度が上限となり、地震計展開長の2, 3倍程度が下限となると見積もられている（稲崎，2002）。したがって20cm 間隔48ch 仕様では1m ~30m 程度が、2m 間隔96ch 仕様では10m~600m 程度の範囲がイメージング対象となる。高い分解能を達成するため、固有周波数が28Hz ないし40Hz と、通常の反射法探査に比べてかなり高い地震計を使用している。牽引部材には、全長の短いツールの場合は荷受用の布スリングベルトを、長いツールの場合は軽量で耐張力に優れたステンレスワイヤを使用している。

表-1 使用したランドストリーマーの種類と主な仕様

種類	S_LS20	S_LS30/50	S_LS100	P_LS100/200
チャンネル数	48	48	48	48/96
地震計間隔	20cm	30/50cm	1 m	1 m/2 m
地震計エレメント	L40	L410	GS-20DH	L25E
エレメント数	1	2/4	1	1/4
地震計周波数	40Hz	28Hz	28Hz	40Hz
牽引部材	布ベルト	布ベルト	布ベルト	布ベルト/ワイヤ/ロープ
全長	15m	20/30m	60m	100m/200m
重量	60kg	70/180kg	120/60kg	60/120kg

3. 現地適用結果

研究期間中に表-1 に示す 7 箇所においてランドストリーマーツールによる活断層調査適用実験を実施した。測線数は 14, 測線長は 5400m に達した。

動作する専用の反射法探査データ処理ソフトウェア解析ソフトを用いて処理した。

警固断層は 2005 年福岡県西部地震の震源域の南東延長部に位置する。最新活動時期は約 4,300 年前以降とされており、延長約 22km の西側上がりの左横ずれ断層である(宮下ほか, 2007)。桑名断層は養老断層系の一部を構成し、延長約 18km, 西側上がりの逆断層であり、沖積層を最大で約 10m 変位させている(栗田・吉田, 1991)。新潟県川口町田麦山地区では中越地震で建造物の 90% が全壊するという大被害を受けたが、地区内においても倒壊率に差異が認められ、伏在断層の存在や極浅部の地盤構造の局所の変動の影響が推定されていた(宮地ほか, 2006)。池田山断層は伊吹山地の東縁を南北に走る逆断層で、延長は約 16km と推定されている(岐阜県, 1998)。呉羽山断層は富山市婦中町安田地区における反射法地震探査や群列ボーリングによって、低角の逆断層であることが明らかになっていた(富山県, 1997; 吉岡ほか, 2007) が、北方延長部が市中心部のどこを通過するかはよく分かっていなかった。綾瀬川断層は、埼玉県大宮台地北東部を北西-南東に走る活断層で、その南東延長が首都圏まで延伸しているかが不明であった(渡辺, 2007)。に位置は不明であった。新潟平野の西縁付近を南北に走る長岡平野西縁断層帯、角田・弥彦断層は、延長約 25km, 最表層から深さ 2km 近くまでの堆積層を変形させていることが知られている(石油公団, 1998)。最近発生した 2007 年中越沖地震以降、近接する大規模原子力発電所への影響を評価することを目的とした詳細調査が各機関で進められている(石山ほか, 2009)。

以上の現地適用調査のうち、桑名断層と角田・弥彦断層に対する適用結果を以下に概述する。

3.1 桑名断層における浅部変形構造調査結果

桑名市の東込上地区において、主断層通過部から前縁部にかけて約 400m の測線を設定した(図-2)。同地区においては以前に P 波反射法探査および群列ボーリングが実施されており、浅部の変形構造が解析されていた(栗田・吉田, 1991; 地質調査所, 1997

など)。それによると、同地区では沖積平野面が、逆断層である桑名断層の活動によって西側(上盤側)が隆起するとともに幅約 900m の東傾斜の撓曲構造を形成している。この変位地形は、調査地域の北部では東名阪自動車道を横断しており、南部では JR 関西本線や近鉄名古屋線が極近傍を通過している。揖斐川、長良川とも近接しており、活動時にはこれらのライフラインが甚大な被害を被ることが懸念さ

表-1 活断層調査手法適用実績

調査地	対象断層/構造	測線名/測線長	適用ツール
福岡市	警固断層/ 伏在断層	PW_Naka06R30 282m	S 波 LS30
桑名市	桑名断層 浅部変形構造	PW_KW_W,M,E 112/59/306m	S 波 LS50 CDP50
川口町田麦山	激震ゾーン	PW_TMG_S1,S2 300/260m	S 波 LS50
大垣市	池田山断層 伏在断層	PW_OGK_S,P 650/470m	S 波 LS50 P 波 LS100
富山市	呉羽山断層 断層構造	PW_FC_1S,P/575m PW_TY_S1/102m PW_TY_S2/105m	P 波 LS100 S 波 LS50
荒川	綾瀬川断層 断層有無	PW_ARG_22 652m	S 波 LS100
新潟市	角田・弥彦断層 逆断層構造	PW_NYG_1 954m	P 波 LS100

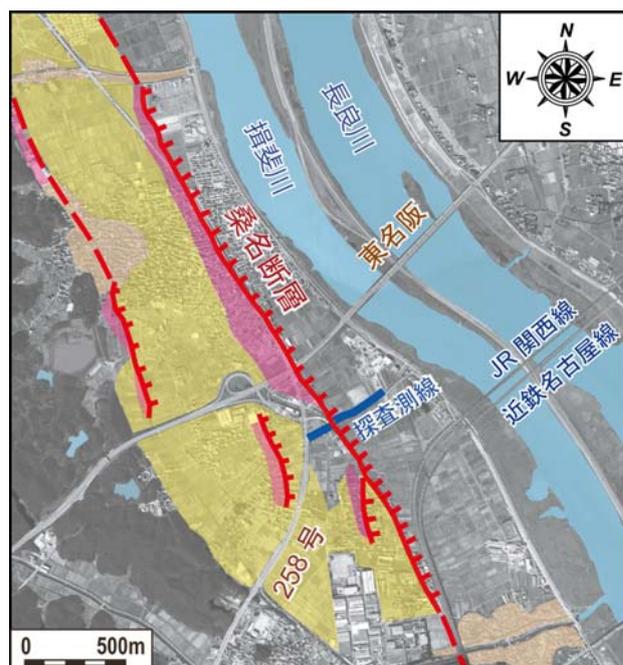


図-2 桑名断層調査位置(稲崎ほか, 2007)

れていた。

桑名断層に対する探査結果を図-3 に示す。同図には、他機関で実施された群列ボーリングの柱状図と、それらに基づいて解釈された、何枚かの反射面(地層境界)を重ねて表示してある。主断層部で地層が大きく変形していること、また断層下盤側では東側にゆるく傾斜する反射面が、局所的に変形してい

ることがとらえられている。特徴的であるのは、下位の反射面ほど変形の度合いが大きく、傾斜も大きくなる傾向が明瞭に認められることである。以上の解析結果は、東側断面に認められる傾斜構造が基本的には断層運動による撓曲によって形成されたものであること、累積性を示す反射面の変位から断層活動の個々のイベントを抽出できる可能性があること

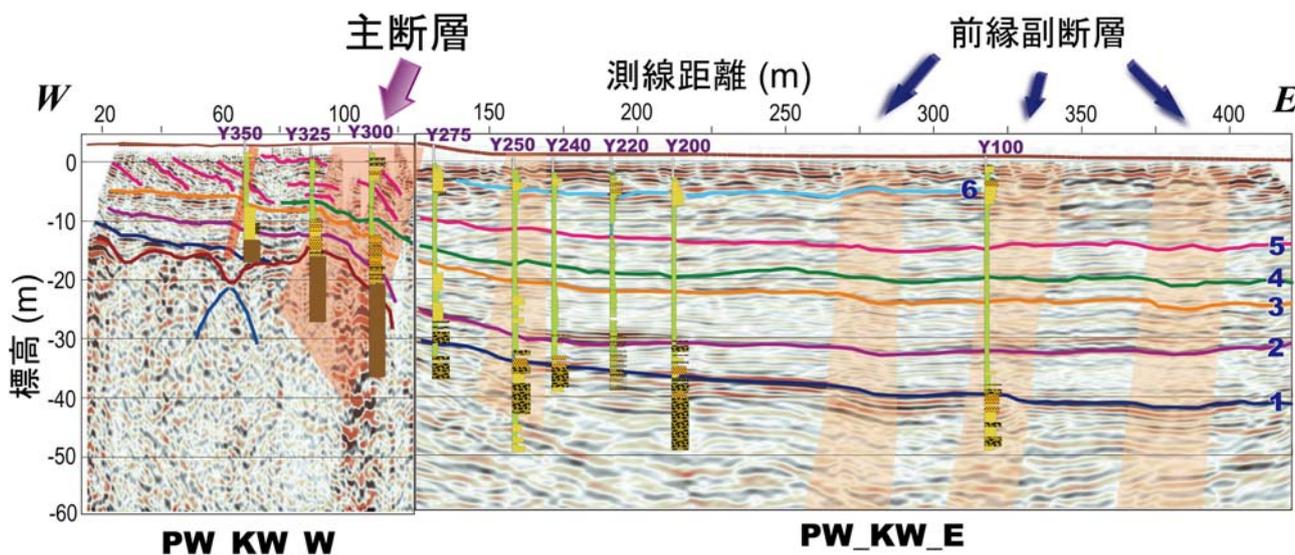


図-3 桑名断層の浅部変形構造解析結果 (Inazaki and Nakanishi, 2008)

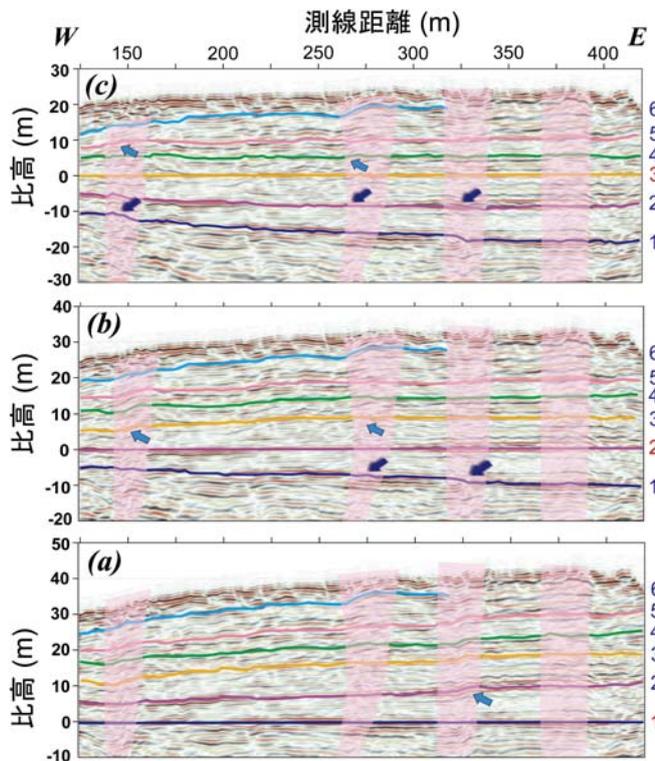


図-4 水平化处理による桑名断層の変位イベントの識別 (Inazaki and Nakanishi, 2009)

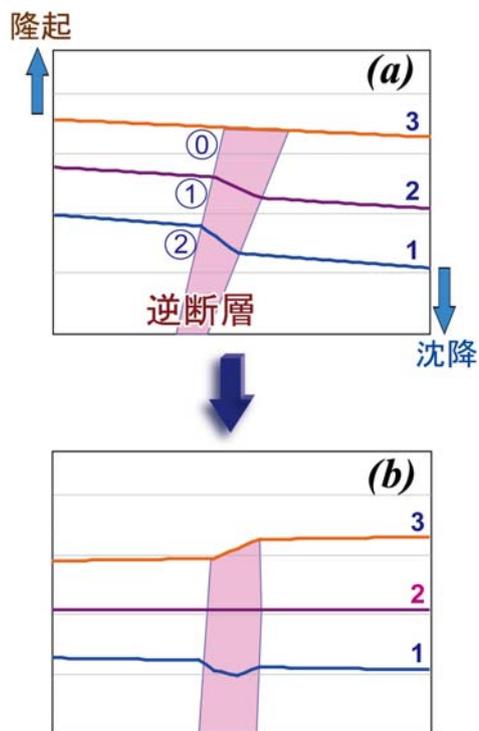


図-5 水平化处理による断層累積変位の出現様式

を示している。そこで、抽出した反射面を水平化する処理を反射断面に対して施した(図-4)。特定の反射面を水平化した場合、その反射面の形成前後に断層が活動して変位が発生していると、その上下の反射面に図-5 に示すような特徴的な変形構造が現れる。このような特徴的な構造を、図-4 から少なくとも3箇所で見出すことが可能である。このことは、逆断層が地震によって活動する場合、主断層だけでなく、前縁の副断層が変位を発生させる場合があること、地震時の断層変位の影響は、主断層の前縁部にも及びること、を意味している。また本現地適用調査によって、ランドストリーマーを用いた高分解能反射法探査が断層の浅部変形構造の把握に有効であることも実証された。線形構造物に対する活断層の影響を評価する場合、主断層だけでなく、前縁部を含む一定幅のゾーンに対して、断層変位による地盤破壊を想定した対策を講ずべきであることを示している。

3.2 角田・弥彦断層における浅部変形構造調査結果

適用調査の対象とした角田・弥彦断層は長岡平野西縁断層帯を構成する活断層の一つで(図-6)、北方の日本海側に連続しているか否かがその活動規模を評価する上で問題となっていた。そこで海陸境界部に測線を設定し、P波ランドストリーマーを用いた反射法探査を実施した。探査結果として重合後時間断面を図-7に示す。この図では、往復走時100ms付近に起伏する強い反射面が認められる。この反射

面には測線距離 5000m から 5300m 付近の間でバルジ状の高まり(プレッシャーリッジ:断層運動によって生じた凸状の小丘地形)を解釈することが可能である。バルジの両翼の反射面は著しく屈曲しており、断層面の存在を示唆する。ただし当該断層群の



図-6 長岡平野西縁断層帯角田・弥彦断層群の分布と断層調査位置

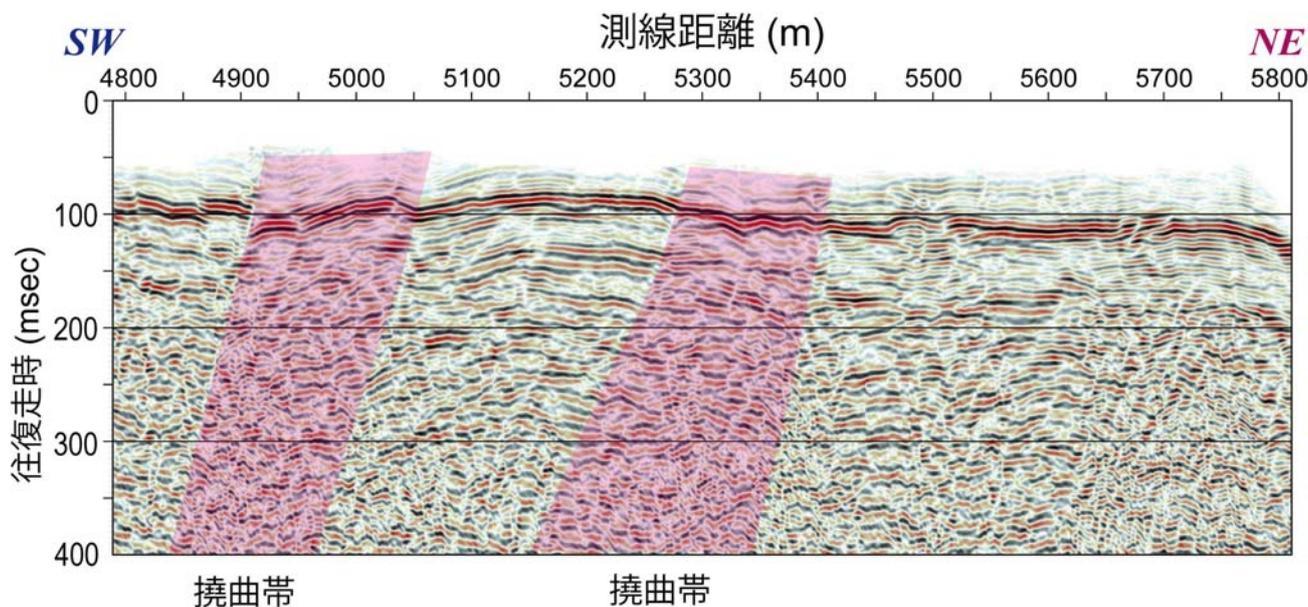


図-7 新潟市四ツ郷屋地区 P波ランドストリーマー探査結果

主断層であるか、後縁副断層（バックスラスト）であるかは測線長が短く不明である。既往調査では、主断層部は本探査測線の右端部に解釈されているので、本探査で解釈された断層は、逆断層上盤側に特徴的に発達するバックスラストである可能性が高い。表層部の重合速度（ V_{stk} ：1600～1800m/s）から推定されるこの反射面の深度は 80m 前後と見積もられ、周辺のボーリングデータを参考にすると沖積層基底礫層（G1 層）に比定される。

長岡平野西縁断層帯は、今後 30 年の間に地震を発生させる可能性が、国内の陸域主要活断層のなかではやや高いグループに属しており、各断層群が個別に活動するか、あるいは一体的に活動する可能性があるのかを評価することが求められている。表層部の変形構造を、近傍で実施された他の探査断面と比較することで断層の連続性を評価することが可能となると考えられる。

4. まとめ

活断層周辺地盤の浅部断層変形構造を把握することが可能な調査手法として、ランドストリーマーツールを利用した高分解能反射法探査の有効性を、実際の活断層に適用して検証した。研究期間中に 7 箇所 14 測線で適用調査実験を実施した。その結果、同手法によって伏在活断層の位置と、断層周辺の擾乱構造を詳細にイメージングすることができた。また反射断面の変形構造を詳細に解析することで、対象断層の活動史を解明するとともに地震動確率予測の精度向上に貢献することが可能であることが実証できた。

参考文献

- 栗田泰夫・吉田史郎 (1991)：桑名断層および四日市断層の完新世における活動，活断層研究，9，61-68 稲崎富士(1992)：地盤調査技術の開発，地下空間の利用技術の開発報告書，第3分冊，2-26，建設省
- 岐阜県 (1998)：池田山断層に関する調査成果報告書，岐阜県活断層調査委員会，97p.
- 稲崎富士・加野直己 (1999)：高分解能 S 波反射法及びサイスミックコーン貫入試験による角田・弥彦断層群の浅部構造調査，地質調査所速報，No. EQ/99/3（平成 10 年度活断層・古地震研究調査概要報告書），59-68.
- 加野直己・山口和雄・栗田泰夫 (1999)：角田・弥彦

断層群の P 波反射法地震探査，地質調査所速報，No. EQ/99/3（平成 10 年度活断層・古地震研究調査概要報告書），47-58.

加野直己・稲崎富士・山口和雄・田中明子 (2006)：警固断層南東部での極浅層反射法調査，活断層・古地震研究報告，No.6，143-152.

宮地良典・小松原琢・中澤努・中島礼・稲崎富士・吉見雅行(2006)：2004 年新潟県中越地震時の新潟県川口町田麦山地区の建物被害と扇状地堆積物の層厚の関係，地球科学，60，481-487.

宮下由香里・吾妻崇・二階堂学・岡崎和彦 (2007)：警固断層の活動履歴，月刊地球，Vol. 29，No. 2，133-138.

富山県 (1997)：平成 7 年度呉羽山断層に関する調査成果報告書.

石油公団(1998)：平成 10 年度国内石油・天然ガス基礎調査 陸上基礎物理探査「西山・中央油帯」調査報告書，61p.

吉岡敏和・細矢卓志・橋本智雄・真柄耕治(2007)：砺波平野断層帯および呉羽山断層帯の古地震調査。活断層・古地震研究報告，no. 7，181-196.

渡辺満久・太田陽子・栗田泰夫 (2001)：鳥越断層群の群列ボーリング調査。活断層・古地震研究報告，No.1（2001 年），産業技術総合研究所地質調査総合センター，87-96.

RESEARCH ON DETAILED IMAGING AND MODELING OF ACTIVE FAULTING STRUCTURE

Abstract : Active faults which have the potential to cause disastrous earthquake in the near future are widely distributed in Japan. As well known, faulting structure recorded in the near surface layer is the key to reveal the behavioral pattern of each fault and evaluate the potential activity. High resolution seismic reflection method using Land Streamer developed by PWRI was successfully applied to image the near-surface detailed structure of active faults. During the research period, the method and the tool was tested at 7 sites, 14 survey lines, and a total of 5,400 m profiles were obtained as a fruitful result. It was proven that high-resolution shallow seismic reflection surveying using Land Streamer was helpful to provide valuable information regarding seismic zoning near an active fault for earthquake disaster prevention of infrastructures.

Key words : active fault, Land Streamer, seismic reflection surveying, near-surface faulting structure.