

◆ 報 文 ◆

S波起震機を用いた活断層調査

倉橋稔幸* 稲崎富士**

1. はじめに

活断層は内陸型地震の震源として活動し、地表に変位と地震動を及ぼす。活断層には同じ場所で繰り返し地震を発生させる特徴があり、活動の痕跡は地表に線状模様として残され、現世の崖や谷の一部として地表に分布する。

1999年に台湾で発生した集集地震(マグニチュードM7.7)では、延長80kmあまりにわたり地表に変位が認められ、その変位は最も大きいところで水平方向に8m、上下方向に9mであった。震源から約50km離れた石岡ダムでも垂直に7mもの断層変位があり、その断層周辺部を破壊に至らしたのは記憶に新しいところである¹⁾。これまでの研究からM7クラスの地震でも過去の複数の内陸型地震から地表に数m程度の変位を生じると考えられている²⁾。しかしながら、地震時に地表に突然生じる数mの変位に対して追従させて安全性を確保することは、現在の土木技術では構造物の設計・施工・管理の各面で困難である。よって、日本国内におけるダム等の大型土木構造物では、計画段階から断層位置や活動履歴を詳細に調査し、その変位が及ぶおそれのある断層近傍を避けて設計・施工するのを常としている。

一方の地震動については、兵庫県南部地震以降、土木構造物の設計における現在から将来にわたって考えられる最大級の強さをもつ地震動(レベル2地震動)への対処が求められるようになった。レベル2地震動に対する耐震性能照査では、内陸型地震においては、断層の延長・傾斜角・幅等を仮定し震源を想定する必要がある³⁾。その情報の多くは文献情報に頼っているが、既存のトレンチ調査や物理探査等から断層の位置や傾斜角が明ら

かにされている場合や、過去の地震における震源分布から推定されている場合は稀である。しかしながら、このような情報を文献から得ることができない場合の方が圧倒的に多いのが実状である。

したがって、土木構造物の計画段階から、断層近傍を避け、地震動に対する耐震性能照査を行うには、断層の詳細な地下構造並びに地盤のS波速度構造を明らかにしておく必要がある。その点において、S波による反射法地震探査はS波速度を実測でき、かつ地下からの反射波を解析することにより地下構造を取得できるので、最も効果的な手法である。しかしながら、S波はこれまでに板たたき法などの小出力の手法が主に用いられてきたため、表層地盤の調査に限られていた。これに対し、S波起震機による高出力の震源を利用することで、従来の100m程度から10倍以上の約1kmの深度まで調査深度を拡げることが可能となり、断層位置の他に、レベル2地震動への耐震性能照査に必要な断層の傾斜や幅等の情報収集も可能となる。筆者らはこれまでにS波起震機を用いた反射法地震探査の開発に取り組んできた^{4),5),6)}。

本報告では、平成15年に発生した宮城県北部の地震における震源域の南で、S波起震機を用いた反射法地震探査を実施し、活断層周辺の地下数km以浅の地下地質構造を明らかにした結果について報告する。

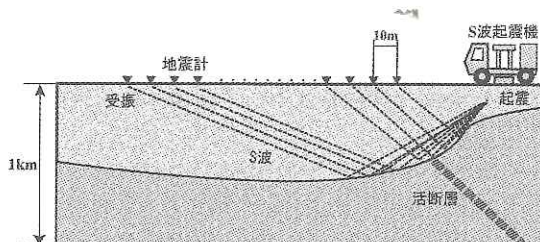


図-1 S波起震機を用いた活断層調査

2. 宮城県北部の地震

宮城県北部を震源とする地震は、平成15年7月26日に旭山丘陵の地下約10kmを震源とし発生した。この地震で、M6以上の大きな揺れが1日の間に立て続けに3回発生し(図-2)、震源域の宮城県鳴瀬町・南郷町・矢本町では震度6強が観測された。消防庁の報告によると、この地震による被害は負傷者667人、被害家屋16,558戸、被害総額234億円に達した。また、砂防学会の報告によると、岩盤崩壊や表層崩壊が95箇所が発生した。しかしながら、地震の大きさがM7に達しなかったことから地表にまで断層による変位を及ぼさなかったと考えられる。その後の余震分布は旭山丘陵の地下約10kmから東方の石巻にかけて徐々に浅くなり、震源として活断層の存在が示唆された。この震源域近傍には、旭山撓曲⁷⁾や石巻湾断層^{8),9)}などの存在が指摘されている(図-3)。次節では、これらの活構造と地形・地質について述べる。

3. 震源域の地形と地質

本震源域には、標高250m以下の丘陵と沖積平

野が分布する。旧最上川や鳴瀬川などの河川により形成された沖積層が広がり、海岸には砂丘が認められる。一方、旭山丘陵や松島丘陵は新第三紀中新世から第四紀更新世にかけての地層を基盤とし、貫入岩や火山砕屑岩、凝灰岩・凝灰質砂岩・泥岩・酸性凝灰岩の互層、凝灰質砂岩を介在した砂泥互層等の陸生または浅海成の堆積物から構成されている¹¹⁾。

このうち旭山丘陵に分布する鮮新統の西側は東側に比べて20m隆起し湾曲している。新編「日本の活断層」⁷⁾によると、旭山撓曲は陸上で延長約8kmに及び、確実度Ⅱ～Ⅲの活断層として記載され、その地下には西側に傾斜した逆断層の存在が示唆される。また、旭山撓曲の東方には、日本海形成時の新第三紀中新世に形成された正断層で、その後に逆断層として活動している石巻湾断層が分布する。石原ほか(1990)⁸⁾やSato et al.(1990)⁹⁾は、石巻湾海底の地質調査結果から、石巻湾海底で確認した断層が陸上の断層にまで連続することを指摘していた(図-3)。しかしながら、旭山丘陵の南側には現世の砂州や後背湿地等の沖積層に覆われている上、その地表には断層変

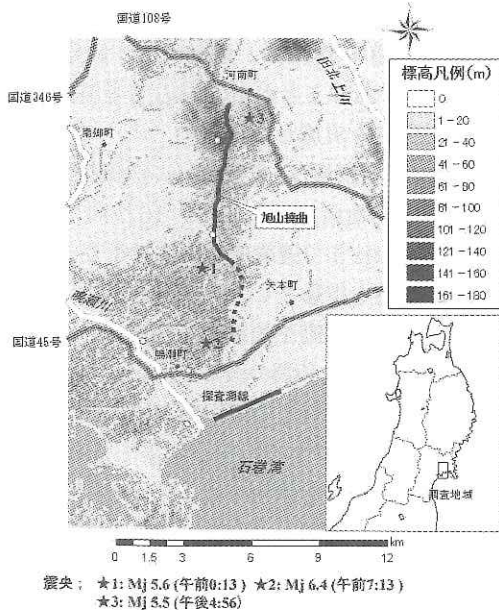


図-2 宮城県北部の地震の震源分布と調査測線
図中の調査測線の位置で、S波起震機を用いた反射法地震探査を実施した。

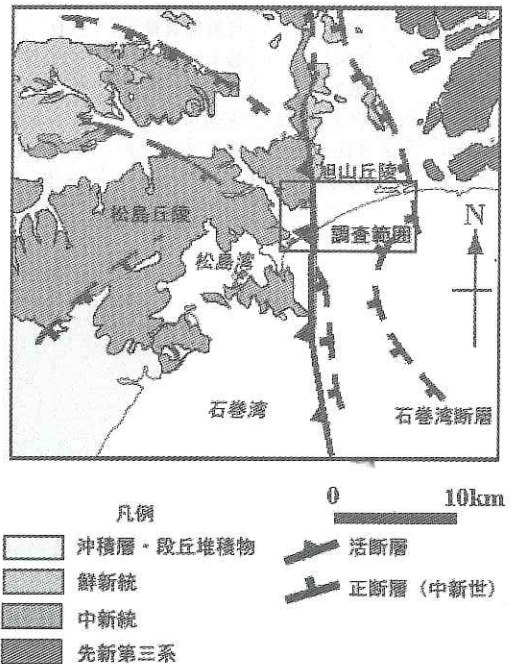


図-3 石巻湾沿岸の地質図
石井ほか(1982)¹⁰⁾にSato et al.(2002)⁹⁾を加筆した。

位の痕跡は認められないことから、断層の連続性については裏付けがなかった。さらに地震後に震源域では、加藤ほか(2004)¹¹⁾や横倉ほか(2004)¹²⁾がP波を用いた反射法地震探査を実施し、陸上で東向きに傾斜した中新世の断層の地下構造を明らかにした。

本研究では、この複雑な震源域の地下構造を明らかにすべく、鳴瀬川河口東側の石巻湾に面した海岸沿いで大型S波起震機を用いた反射法地震探査を実施した。

4. S波起震機を用いた反射法地震探査

4.1 S波起震機

写真-1に反射法地震探査の震源として利用したS波起震機を示す。S波起震機の総質量は26.7トンで、質量約2.7トンの鋼鉄製ベースプレート

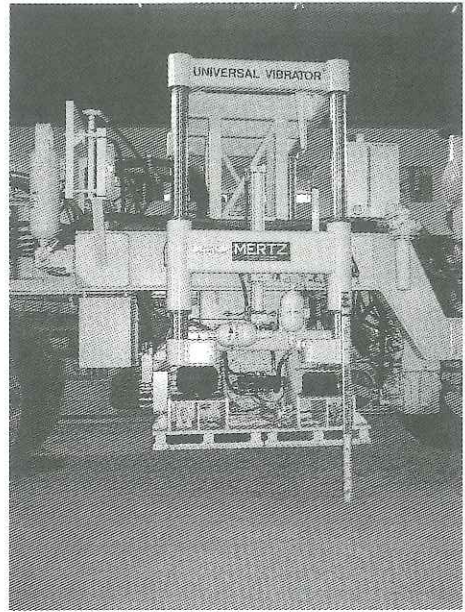


写真-2 大型S波起震機の起震部分
鋼鉄製ベースプレートを地盤に押し当て、手前から奥方向へ水平方向に震動させ、地盤にS波を入射した。

表-1 S波起震機の諸元¹³⁾

車体仕様		起震機仕様	
車体長	9.9m	反動体質量	2.7t
車体幅	2.6m	可動部質量	5.4t
車高	3.2m	最大加震力	133kN
車体質量	26.7t	ピストン断面	64cm ²
エンジン	ディーゼル	実効ストローク	8インチ
排気量	9.1L	設置プレート	610×750 ×40mm
最高出力	345HP	スイープ周波数	5-100Hz



写真-1 S波起震機

4.2 現地調査

この調査では、図-4に示すように鳴瀬川河口から石巻湾沿いの海岸堤防沿いの道路に約4.3kmの範囲に地震計を10m間隔に配置し反射法地震探査を実施した。ただし、図-5に示すように、一度に計測できる範囲は、地震計144個分の区間(1,430m)であることから、この調査範囲を3回に分けて探査を実施した。

震源のS波起震機は、質量2.7トンの鋼鉄製のベースプレートを地面に押し当て、16秒間にわたり10Hzから32Hzまで連続的に周波数を変えながら効果的に地盤を震動させ、S波を地盤に入射した。この時に生じた震動を地震計で受振し、2ms間隔で震動開始から24秒間の波形を記録した。震源から最も離れた地震計までの距離(最大オフセット距離)は1,800mであったが、起震をさらに1~7回繰り返し、信号を重合させることで、信号/雑音比(S/N比)を向上させた。また、起震位置の表層が軟弱な場所では、出力を調整し震動させるなど工夫した。震源から1.43km離れた位置でも信号が十分に伝播することが、図-6に示す波形記録からも分かる。測線沿いに10mまたは20m間

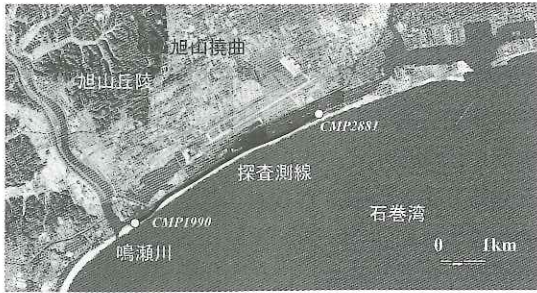


図-4 反射法地震探査の測線位置

図中の鳴瀬川河口から石巻港にかけての探査測線の位置で反射法地震探査を実施し、その区間にCMPを5m間隔にCMP1990からCMP2881までを割り当てた。

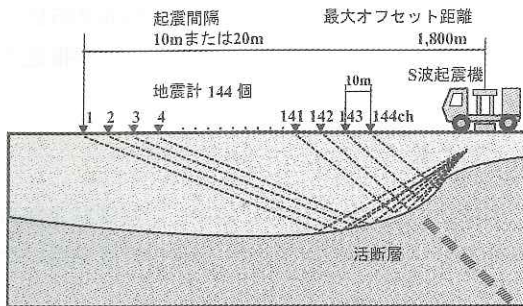


図-5 固定展開の概略図

表-2 反射法地震探査パラメーター一覧

項目	内容
起震間隔	10mまたは20m
地震計設置間隔:	10m
最大重合数	144
最大インラインオフセット距離	1,800m
展開測線	固定, 3展開
チャンネル数	144
サンプル間隔	2ms
レコード長	8s
震源	S波起震機
周波数	10~32Hz
スイープ時間	16s
スイープ回数	1~8回

隔に起震をおこない、合計554の波形記録を得た。データ取得のパラメーターを表-2に示す。

4.3 データ解析

反射法地震探査から得た554個の波形記録から反射波を取り出し、波形記録を、図-7に示す解析フロー図に従いCMP重合法を用いて解析した。その際にCMP間隔を5mに、図-4に示すように

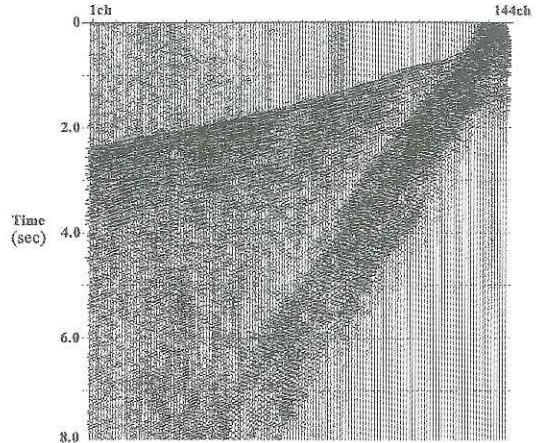


図-6 波形記録

鳴瀬川の河口から石巻港にかけての区間にCMP1990からCMP2881までを5m間隔に割り当てた。CMPはCommon Mid-point (共通反射点)の略で、S波起震機と地震計との中点に位置する。S波起震機の位置を変えながら起震することにより、同一地点における複数のCMPを得ることができ、その反射波を重ね合わせることで、地下の構造をより鮮明に画像化できる。

そのために、まず起震ごとの記録された波形を、各CMPごとに波形を再編集 (CMP編集) した。次にこれを、周波数フィルターやデコンボリューションフィルター等の処理をおこない、信号からノイズを取り除いた。さらに地震計に伝わる時間差から、表層地盤のS波速度を200m/s、基盤岩の速度を700m/sとして見積もり、地盤の速度構造や地形の凹凸を見積もり反射波の位置を補正した。

最後にこれら再編集および処理されたデータを重ね合わせ (重合)、回折波を取り除く処理 (マイグレーション)をおこない、解析断面を出力した。解析結果を図-8に示す。

5. 研究結果

5.1 反射法地震探査の結果

図-8の反射波は0から2秒までの範囲で明瞭である。図-6の波形記録等から屈折波のS波速度は約700m/sである。そこから探査範囲は、深度1,400mに相当する。

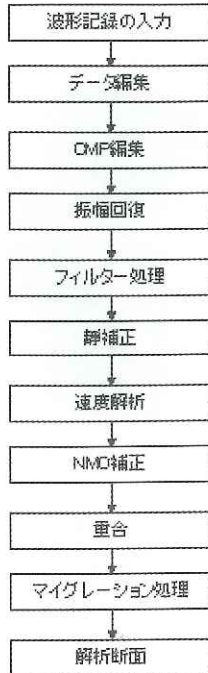


図-7 解析フロー図

明瞭な反射波は1s前後の位置に認められ、これが西側の鳴瀬川河口付近のCMP1990～2150の位置で東側へ傾斜し、CMP2150～2881では水平の構造が読み取れる。この境界は付近の表層における地質分布から推定すると、新第三紀層と更新世の地層境界に相当する。また、同様にこの部分での東側への落ち込みは、旭山撓曲に相当し、その南側延長に相当すると予想される。それは石巻湾内の海底にまで連続していると考えられ（図-3参照）、石原（1990）やSato et al.（2002）の考え方を支持するもので、旭山撓曲の延長は従来の「新編」日本の活断層に記載された8kmの5倍である40km以上の長大なものであることが推定される。

6. まとめ

本報告では、平成15年に発生した宮城県北部の地震における震源域の南で、S波起震機を用いた

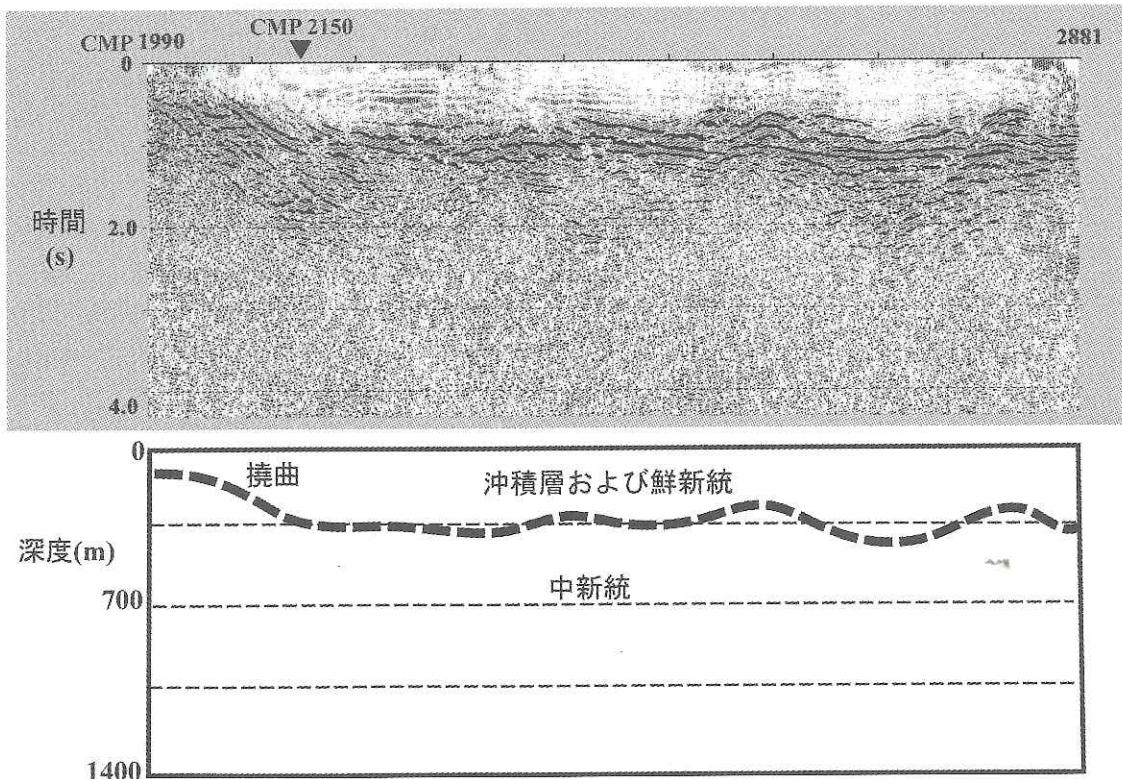


図-8 反射法地震探査の解析断面図

図-6の波形記録等から基盤岩のS波速度を700m/sと見積もり、時間断面（上段）から深度断面（下段）を作成した。

反射法地震探査を実施し地下構造を解析した。その結果、旭山撓曲周辺における地下1km以浅までの地質構造を反射波を推定することができた。反射波の分布や傾斜から撓曲の位置や傾斜を読み取ることができ、レベル2地震動等の耐震性能照査にも役立てることができる。

今後は、1km以深からの信号も受振できるようにS波起震機や地震計を改良し、受振記録のS/N比を改良し地質構造の解析精度を向上させたいと考えている。また同時に、地盤のS波速度構造を解析することにより活断層の理論的なハザードマップ作成に役立てる予定である。

参考文献

- 1) 松浦一樹、大友淳一、永田高弘、小林 淳：台湾921集集地震に伴う地震断層について、地質ニュース、地質調査所, no.545, pp.7-22, 2000.
- 2) 松田時彦：活断層、岩波新書, 242p., 1995.
- 3) 片岡正次郎、日下部毅明、村越 潤、田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究、国土技術政策総合研究所報告, No.15, 32p., 2003.
- 4) 稲崎富士・倉橋稔幸 (2003. 10) : S波バイブレータによる反射法地震探査—千葉県印旛沼における基礎実験—、日本地震学会2003年秋季大会講演予稿集, B047.
- 5) 倉橋稔幸、稲崎富士：2003年宮城県北部地震震源域南部におけるS波バイブレータ反射法地震探査、地球惑星関連合同学会, CD-ROM, 2004.
- 6) Kurahashi, T and Inazaki, T.: "S-wave seismic reflection survey conducted at the southern part of epicentral area of the 2003 Northern Miyagi earthquake", Proceedings of the 7th SEGJ International Symposium, pp.463-466, 2004.
- 7) 活断層研究会編：[新編]日本の活断層、東京大学出版会, 437p., 1991.
- 8) 石原文実、駒沢正夫、中村光一、西村 昭、棚橋学、斎藤英二、渡辺和明、本座栄一、井上英二、有田正史、木下泰正、玉木賢策、上嶋正人、西村清和、村上文敏、岡村行信、山崎俊嗣、斎藤文紀：金華山沖海底地質図、海洋地質図, no.33、地質調査所, 1990.
- 9) Sato, H., Imaizumi, T., Yoshida, T., Ito, H. and Hasegawa, A.: Tectonic evolution of Nagamachi-Rifu active fault system, NE Japan, Earth Planets and Space, vol.54, pp.1039-1043, 2002.
- 10) 石井武政、柳沢幸夫、山口昇一、寒川 旭、松野久也：松島湾地域の地質、地域地質研究報告 (5万分の1図幅)、地質調査所, 121p., 1982.
- 11) 加藤直子、佐藤比呂志、今泉俊文：2003年7月26日宮城県北部地震震源域北部での反射法・屈折法地震探査、地球惑星関連合同学会, CD-ROM, 2004.
- 12) 横倉隆伸、山口和雄、加野直巳ほか：2003年宮城県

北部地震震源域南部における反射法地下構造探査 (その1) : 大型バイブレータ探査結果、地球惑星関連合同学会, CD-ROM, 2004.

- 13) 稲崎富士：S波起震機を用いた原位置地盤震動特性計測システム、土木技術資料、第38巻、第7号, pp.4-5, 1996.7.

倉橋稔幸*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地
盤研究グループ地質チ
ーム主任研究員
Toshiyuki KURAHASHI

稲崎富士**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所技術推
進本部上席研究員 (特命)
Tomio INAZAKI