

# 新潟県中越地震の地震動と地盤特性

## 久田嘉章：工学院大学建築学科教授

### 1 はじめに

本報告では2004年新潟県中越地震の背景と概要、震源近傍での地震動の特性、丘陵地域で集中した地震被害の原因、平野地域での表層地盤と地震動特性などについて概説する。

### 2 2004年新潟県中越地震の背景と褶曲地形

新潟県中越地震が生じた背景は以下の通りである。図1、2に示すように日本列島は2枚の海のプレート（太平洋プレートとフィリピン海プレート）と、2枚の陸のプレート（ユーラシアプレートと北米または東日本マイクロプレート）で形成され、プレートの境界でしばしば巨大地震が発生している<sup>1)</sup>。新潟県の中越地域は図1に示されるように糸魚川-静岡構造線に代表される北米プレートとユーラシアプレートの境界領域に相当し、主として太平洋プレートによる北西-南東方向の圧縮力を受けている。このため図3に示すに中越地方は褶曲地形（水平圧縮力による凸凹の地形）となり、新潟平野側の向斜（凹側）と丘陵地側の背斜（凸側）を形成している<sup>2)</sup>。向斜では地盤が沈降するため平野・盆地が形成されるが、圧縮場であるため基盤は締め固められるのに対し、背斜では地形が隆起するために丘陵地となるが、引張場となるため岩盤が脆くなる。さらに背斜では河川の侵食により急峻な谷地形が形成され、なかでも中越地域は地すべり多発地帯として知られている<sup>3)</sup>。一方、図2にあるように北東-南西方向に走向（断層線）を持つ断層の場合は、北西-南東の圧縮力による逆断層型の地震が生じ、1828年三条地震（M6.9）や1847年善光寺地震（M7.4）に代表されるように中規模地震の多発地域としても知られている。図4に示されるように中越地震の南側の魚沼丘陵では、地表に現れた主たる断層線は丘陵の東側にあり、断層面は西落ち傾斜の逆断層である。一方、中越地震の北側の東山丘陵では、地表での断層線は丘陵の西側にあり、断層面は東落ち傾斜の逆断層として知られている<sup>2)</sup>。中越地震は断層面が西落ちから東落ちに切り替わる中間領域で発生しており、これが後に示すような複雑な本震・余震活動を生じた原因の一つと考えられている（図5参照）。

### 3 本震と余震活動

新潟県中越地震の本震や余震活動の概要は以下の通りである。本震は10月23日17時56分に深さ13kmで発生し、 $M_{JMA}$ （気象庁マグニチュード：気象庁の地震計で計測された波形の振幅から決定されるマグニチュード）は6.8、 $M_w$ （モーメントマグニチュード：海外の長周期地震計で観測される波形を用いて、震源規模の大きさから決定されるマグニチュード）は6.4から6.6であった（米国地質調査所USGSでは6.4、防災科学技術研究所F-netでは6.6）。本震の断層面は西落ちの浅い逆断層であり、東側の断層浅部は地表近くまで達したと考えられている。しかしながら明瞭な地表断層は見つかっていない。図5に示されるように同日の18時03分に $M_{JMA}$ 6.3、18時11分に $M_{JMA}$ 6.0、18時34分に $M_{JMA}$ 6.5を生じるなど<sup>4)</sup>、余震活動が非常に活発であり、救助や避難活動にも大きな支障を生じた。一般に逆断層による地震の断層面が地表に達しなかった場合、解放されない応力により多くの余震活動が生じることが知られている<sup>2)</sup>。加えて、図5の中越地震の本震・余震活動に見られるようにT型の3つの断層面が現れ、西落ちの断層面に加え、東落ちの断層面に沿った余震活動も生じている<sup>4)</sup>。これは先述したように、この地域の複雑な地形・地質構造を反映していると考えられる。

### 4 断層震源モデルと震源近傍の地震動

本震や余震では震源域で多数の強震記録が観測され、それらから逆解析された震源断層モデルも既にいくつか提案されている（例えば文献<sup>5),6)</sup>）。図6に示されるように震源域での最大加速度や速度は、既往の経験式と比べると顕著に大きい値を示している<sup>7)</sup>。この一因は1995年兵庫県南部地震を契機に全国に多数設置された強震計により、震源域における強震記録がようやく多数得られ始めた成果だといえる。一方、震源逆解析によると、強い地震動を生じた断層部分（アスペリティー）が浅い位置に特定されており、これも震源域で大きな最大加速度や速度を生じた原因の一つと考えられる。

震源域では、断層面上の断層破壊が近づく側に位置する観測点では断層面に直交する方向に大きな地震動が生じることが知られている（ディレクティブィティ・パルス、兵庫県南部地震では大災害を生じた主要因としてキラールパルスなどとも呼ばれている）。本地震の場合は北西-南東方向が断層面に直交する方向に相当するが、強震観測記録や、倒壊・傾斜した建物の傾き、飛び石の方向などから、震源域では北西-南東方向の地震動が卓越したことが確認されている<sup>8)</sup>。

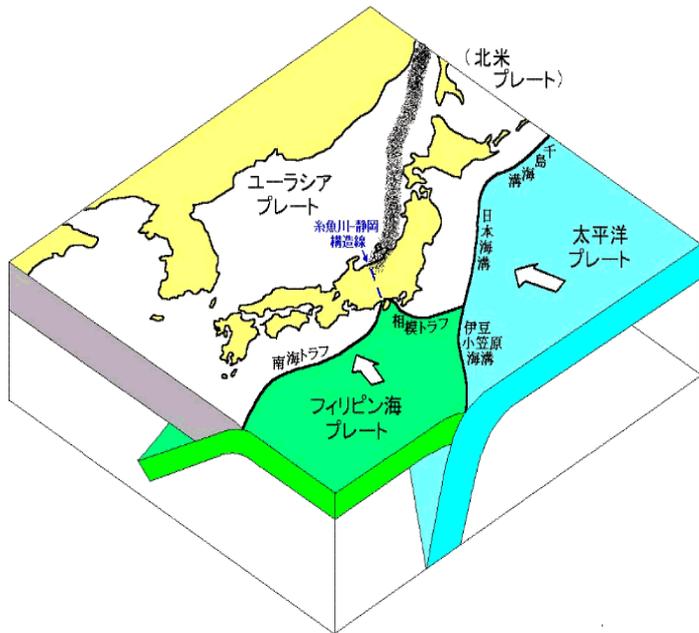


図1 日本周辺のプレート構造と糸魚川-静岡構造線<sup>1)</sup>

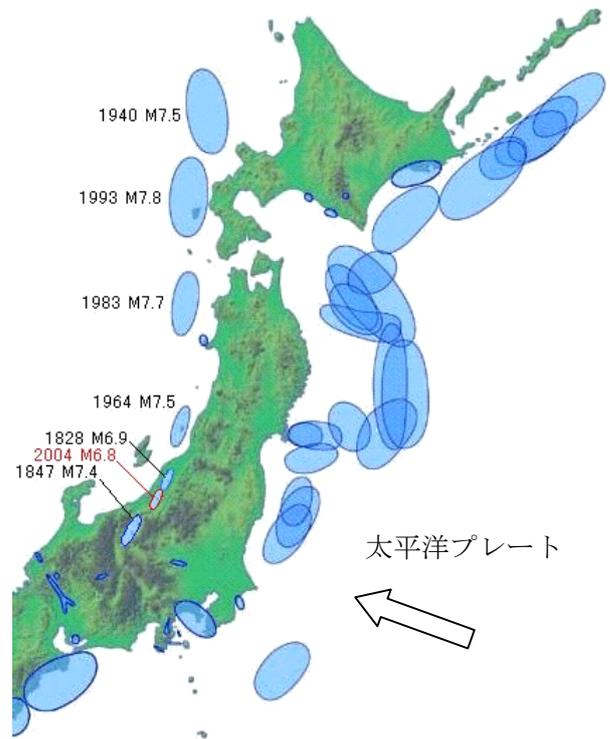


図2 日本周辺の巨大地震と2004年新潟県中越地震(文献<sup>1)</sup>に加筆)

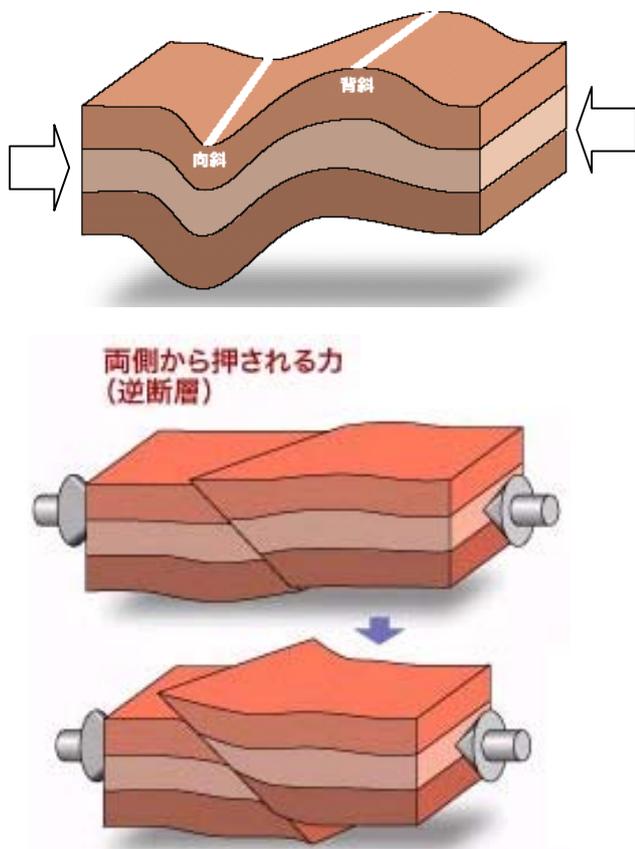


図3 活褶曲と背斜・向斜(文献<sup>2)</sup>に加筆)

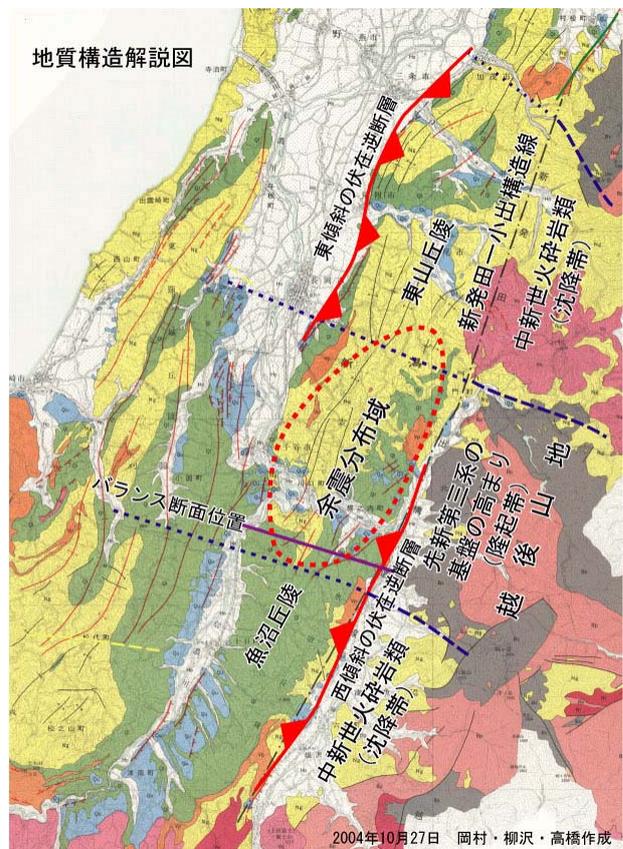


図4 中越地域の地質と断層<sup>2)</sup>

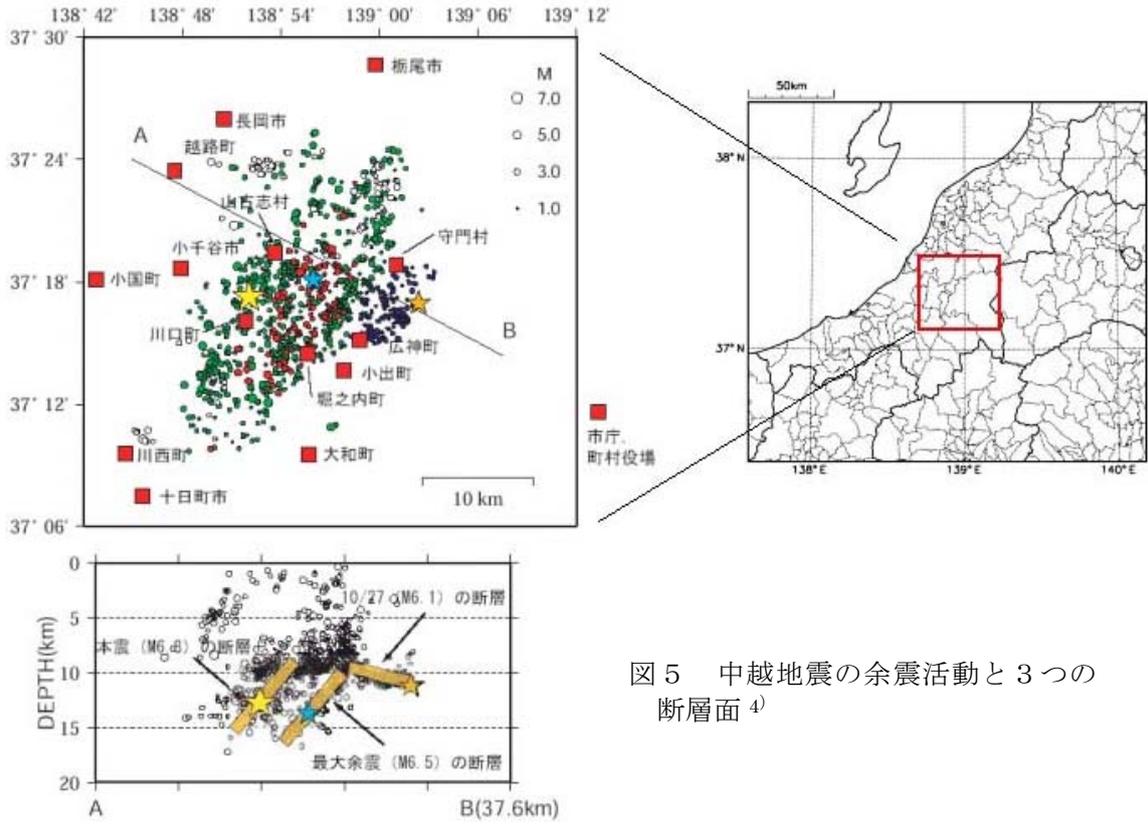


図5 中越地震の余震活動と3つの断層面<sup>4)</sup>

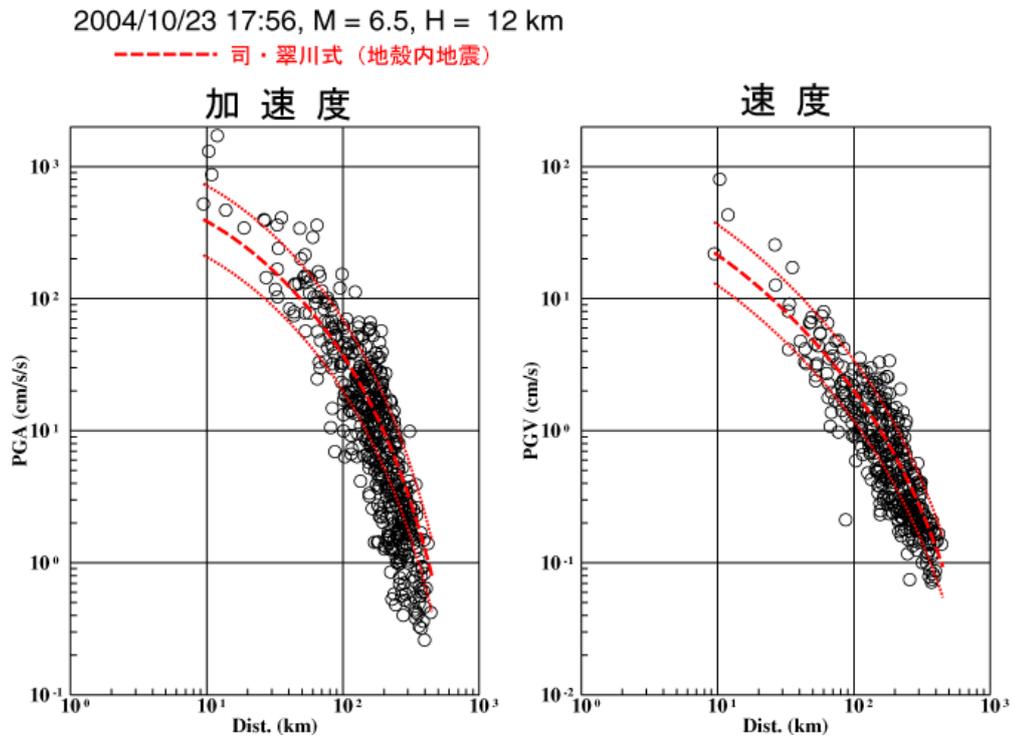


図6 中越地震で観測された強震記録の最大加速度 (左) と最大速度 (右) と既存の距離減衰式との比較<sup>7)</sup>

## 5 丘陵部（活褶曲地形帯）での地形と地震被害

新潟県中越地震による被害の大きな特徴は、平野部よりも丘陵部において地すべり被害ばかりでなく、地震動による甚大な被害が集中したことである。この原因のひとつは図4に見られるように震源断層が浅く、かつ丘陵部の直下に位置したことによる。しかしながら、図7、8に見られるように地震動による被害の集中地域はある特定の地域、特に河川の流域か、活褶曲地形の背斜軸の近くに集中している。先に説明したように、震源域である東山・魚沼丘陵は、北西-東南の圧縮を受ける活褶曲地域であり、隆起する背斜軸では河川的作用によって段丘状の崖地形や、隆起で取り残された馬蹄形の平地に旧河川道を生じる。魚沼川流域では川口町に代表されるように旧河川道が認められ、これが被害の集中地域になった一因と考えられている<sup>11)</sup>。一方、河川から離れた被害の集中地域は、図7、8に見られるように背斜軸に近い扇状地・扇状地性段丘（武道窪、田麦山など）に集中すると指摘されている<sup>11)</sup>。通常の扇状地は硬質な砂礫が堆積しているのに対し、これらの扇状地は、図9に示すように背斜から向斜に向けて生じた地すべりによる第三紀軟岩による軟弱な風化物で形成されている<sup>11)</sup>。これらの軟弱な地盤層が田麦山や武道窪などに見られたように丘陵部の扇状地で被害を集中した原因の一つと考えられている。

## 6 平野部（沖積平野）での地震動と地震被害

信濃川流域の平野部は褶曲作用の向斜（沈降地域）であり、厚さ5 km以上の新第三期以降の堆積層によって新潟堆積盆地を形成している。震源域の北側に位置する長岡市周辺では地震動による被害は少なかったが、丘陵部に近い宅地造成地での盛土の大規模な地すべり被害や、信濃川流域での液状化による顕著な被害が見られた<sup>8)</sup>。

一方、震源域である小千谷市では複雑な地盤特性を反映した興味ある地震記録が観測されている。図10には小千谷市とその周辺地域の地質図（5万分の1）と断面図を示す。上で述べたように小千谷地域は活褶曲帯の向斜軸上にあり、蛇行を繰り返した信濃川とその支流によって多数の段丘や旧河川道、後背湿地が複雑に分布している。図10には強震観測点であるK-net 小千谷、JMA 小千谷、及び免震建物である水仙の家の位置も示している。地質図上では水仙の家は沖積平野上に位置し、一方、K-netとJMAはともに完新世の段丘堆積層上に位置している。図11にはK-net 小千谷の柱状図を示すが<sup>12)</sup>、13m以深には岩盤（図6の断面図では更新世の魚沼層群）が、深さ3 m以深には硬質な礫層があり、その上に3 m程度の非常に軟弱なピート層や盛土がある。図12はK-Net 小千谷での本震、余震、本震前の地震によるフーリエ振幅スペクトルの比較であるが、中小地震時に見られる0.4~0.5秒程度の卓越周期が、本震時には0.7秒程度まで増大しており、地盤が大きく塑性化していたことを示している<sup>13)</sup>。

図13には本震の際に観測されたJMA 小千谷（震度6強）、K-net 小千谷（震度7相当）、水仙の家<sup>14)</sup>（震度6強相当）の加速度波形と応答スペクトル（ $h=0.05$ ）である。互いに800m程度しか離れていないにも拘わらず、K-net 小千谷の振幅が非常に大きく、加速度波形にサイクリック・モビリティ（密な砂地盤で見られる液状化現象の一種）が観測されている。これはEW成分見られるようスパイク状の大振幅の波形であり、地盤が急激に剛性を失って振幅を急増させるが、その後、すぐに剛性を回復し振幅がもとに戻る現象である。従ってこの場合は、地盤の非線形は減衰による振幅を低減させる効果よりも、剛性低下による振幅を増大させる効果の方がはるかに大きかったようである。この結果、K-netの応答スペクトルでは周期約0.7秒に5000 galに近い非常に大きな値を示している。但し、K-netの周辺は新興住宅地であるが顕著な地震被害は報告されていない。サイクリック・モビリティを生じたのはごく表層部分であり、大振幅の波形がそのまま建物に実効入力する可能性は無さそうである。一方、本震時における卓越周期の長周期化（約0.4秒から0.7秒へ）はK-netとJMA観測点に共通して見られる現象であり、塑性化した地盤の範囲は表層の数mだけでなく、深さ100m近くまで及んでいた可能性も指摘されている（東京ソイル、福元俊一氏との私信）。改正建築基準法では地盤の塑性化は工学的基盤以深では生じないと仮定されているが、今後、より詳細に検討されるべき項目である。

一方、図13にあるように水仙の家の波形は3波形の中で最も振幅が小さいが、これは観測点が免震建物の基礎部に位置しているため、入力損失が一因とも考えられる。さらにローカル地盤特性そのものに差があった可能性もある。すなわち山中ら<sup>15)</sup>は市内15箇所余震観測を行ったが、余震から得られた地震動特性は本震と同様に、やはりK-net 小千谷での振幅が最も大きく、JMA 小千谷や水仙の家に近い信濃川流域で最も小さくなっている。従ってJMA、K-net、水仙の家での地震動特性の差異は、小千谷の複雑な表層地盤特性の違いを大きく反映していることが分かる。

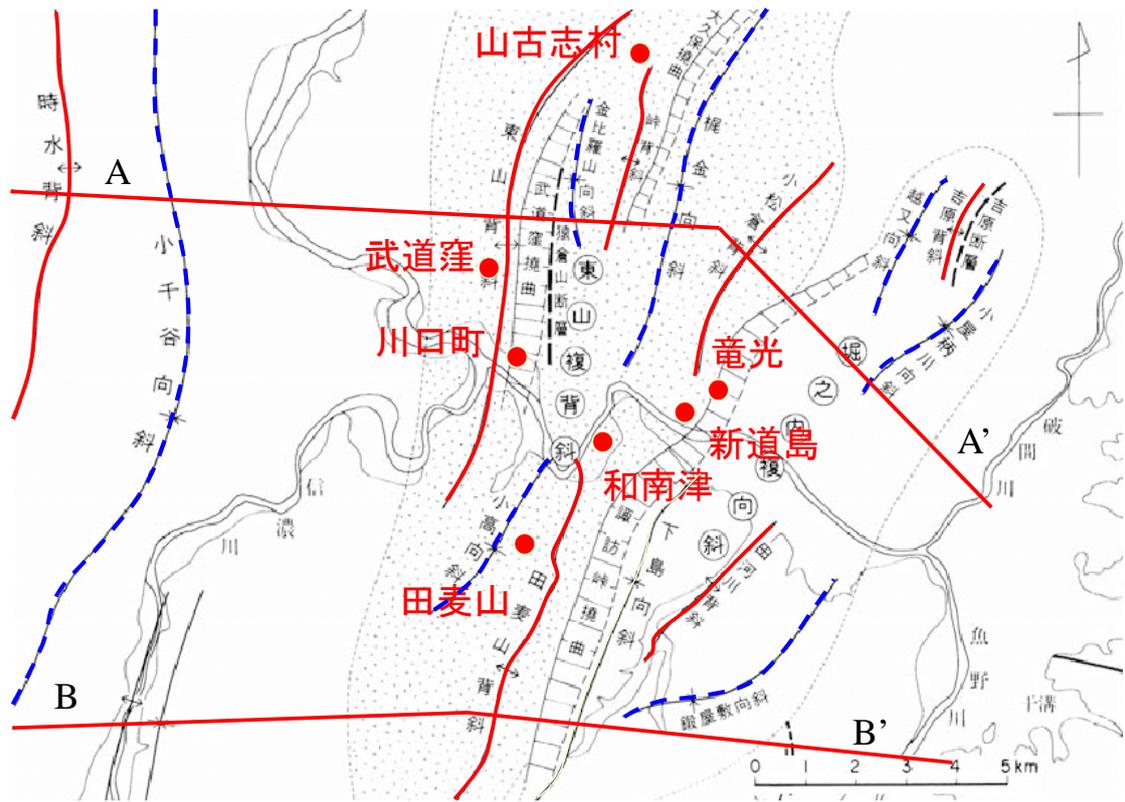


図7 褶曲地形による背斜（実線）と向斜（破線）と大きな被害を受けた地域（文献<sup>9</sup>）に加筆

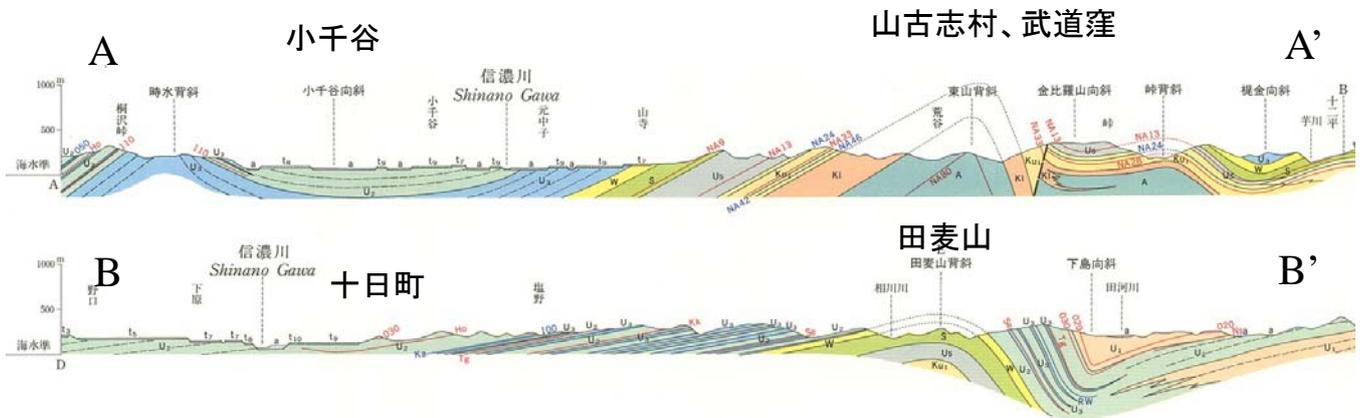


図8 褶曲地形における地質断面図（文献<sup>10</sup>）に加筆

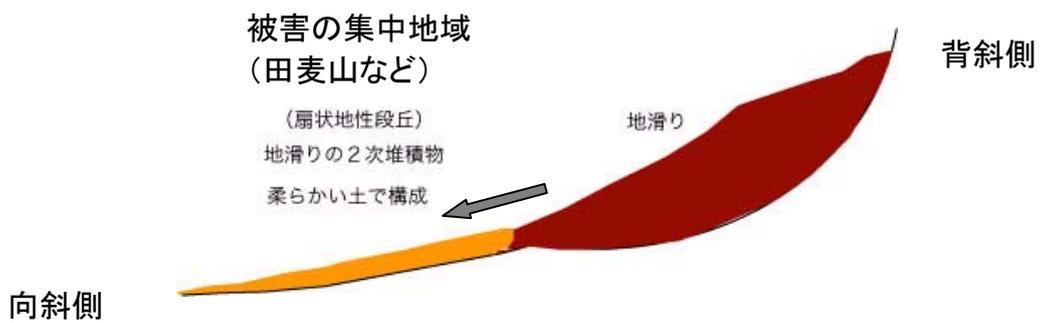


図9 被害の集中地域と地すべり地形との関係（文献<sup>11</sup>）に加筆

## 7 おわりに

ここでは新潟県中越地震の生じた背景や余震の多さ、震源域の地震動、被害の集中域などは中越地方の褶曲地形が大きく影響していることを報告した。さらに強震観測網の充実と浅い震源により震源域で大振幅の地震記録が得られ、サイクリック・モビリティなど地盤の非線形特性の影響も見られた。一方、K-net 小千谷に見られるように観測された地震動の大きさの割には周辺建物の被害は大きくはなく、観測記録と建物への実効入力の関係や、建物の余力や大振幅時における非線形動特性を高精度に評価する必要性が改めて浮き彫りになった。最後に、ここで使用した強震記録は気象庁、防災科学技術研究所、三菱地所設計より提供して頂きました。記して感謝致します。

## 参考文献

- 1) 岡田義光、新潟県中越地震の意味づけ、防災科学技術研究所、2004  
<http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/niigata041023/>
- 2) 産業技術総合研究所・活断層研究センター、新潟県中越地震のメカニズム解明に挑む、2004、  
[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/aist\\_today/vol04\\_12/vol04\\_12\\_topics1/vol04\\_12\\_topics1.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol04_12/vol04_12_topics1/vol04_12_topics1.html)
- 3) 小長井一男、活褶曲地形と地震被害概要、土木学会中越地震被害調査団速報（第一報）、2004  
<http://www.jsce.or.jp/report/32/geology.pdf>
- 4) 地震調査研究推進本部、新潟県中越地震で活動した3つの断層について、2004  
[http://www.iishin.go.jp/main/chousa/04nov\\_niigata/p03.htm](http://www.iishin.go.jp/main/chousa/04nov_niigata/p03.htm)
- 5) 東京大学地震研究所 地震火山災害部門・地球計測部門瀧瀬他、2004年新潟県中越地震 一強震動と震源過程一、2004、<http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/chuetsu/chuetsu.html>
- 6) 防災科学技術研究所、2004年10月23日17時56分の新潟県中越地震の強震動 速報、2004  
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/news/niigata041023/index.html>
- 7) 防災科学技術研究所、PGA・PGV（最大加速度・最大速度）&距離減衰、2004  
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/niigata041023/pg.html>
- 8) 久田嘉章、2004年新潟県中越地震、一地盤と地震被害一、第32回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、2004、<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Member/Boss/Paper/2005/jiban2005.pdf>
- 9) 地質調査情報センター、地域地質研究報告「小千谷地域の地質」、第6章 地質構造、1986  
[http://www.gsj.jp/iishin/chuetsu\\_1023/doc\\_pdf/07\\_050/chapter-6.pdf](http://www.gsj.jp/iishin/chuetsu_1023/doc_pdf/07_050/chapter-6.pdf)
- 10) 地質調査情報センター、5万分の1地質図幅「小千谷」、断面図、1986  
[http://www.gsj.jp/iishin/chuetsu\\_1023/map\\_images/07\\_050\\_geosect.jpg](http://www.gsj.jp/iishin/chuetsu_1023/map_images/07_050_geosect.jpg)
- 11) 産業技術総合研究所・活断層研究センター、甚大被害地区の被害分布と地形との関連について、2004、[http://staff.aist.go.jp/yoshimi.m/damages\\_hp/geo\\_comp/index.html](http://staff.aist.go.jp/yoshimi.m/damages_hp/geo_comp/index.html)
- 12) 強震ネットワーク、K-net、<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 13) 翠川三郎 他、2004年新潟県中越地震の地震動について、第92回工学地震学・地震工学談話会、2004  
<http://www.cuee.titech.ac.jp/events/esse92/essereport92.html>
- 14) 溜正俊、【特集】新潟県中越地震を耐震工学で解剖する、IV 新潟県中越地震にみる建築物の無被害状況、1. 免震・制震の建築物、建築技術5月号、2005
- 15) 山中浩明 他、2004年新潟県中越地震の余震および微動の観測、第92回工学地震学・地震工学談話会、2004、<http://www.cuee.titech.ac.jp/events/esse92/essereport92.html>

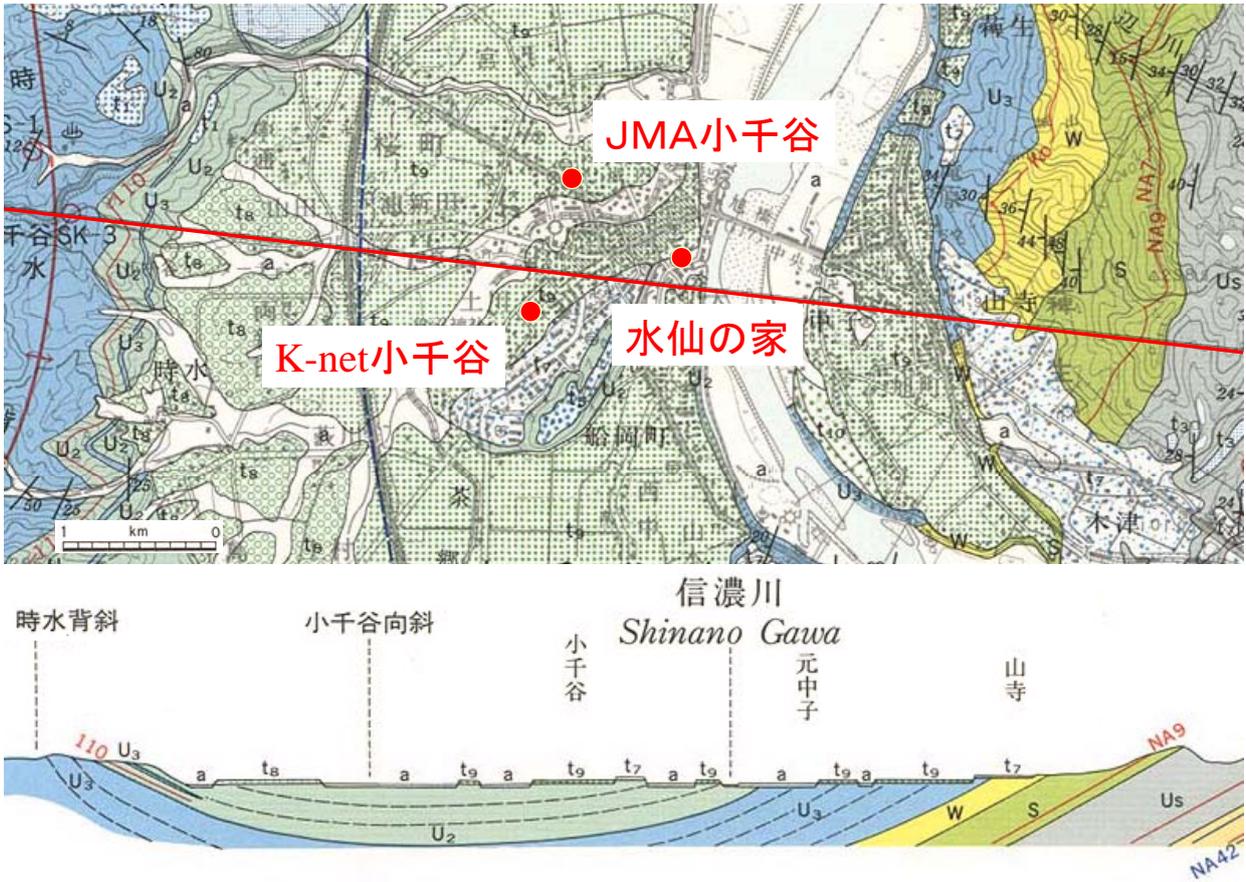


図 10 小千谷市の地質図と強震観測点（上）と地質断面図（文献<sup>10)</sup>に加筆）

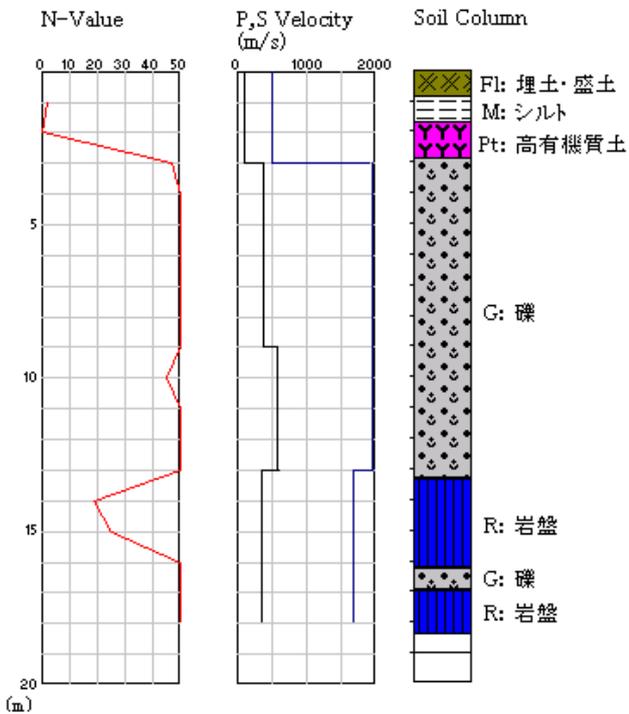


図 11 K-Net 小千谷における地盤柱状図（文献<sup>12)</sup>に加筆）

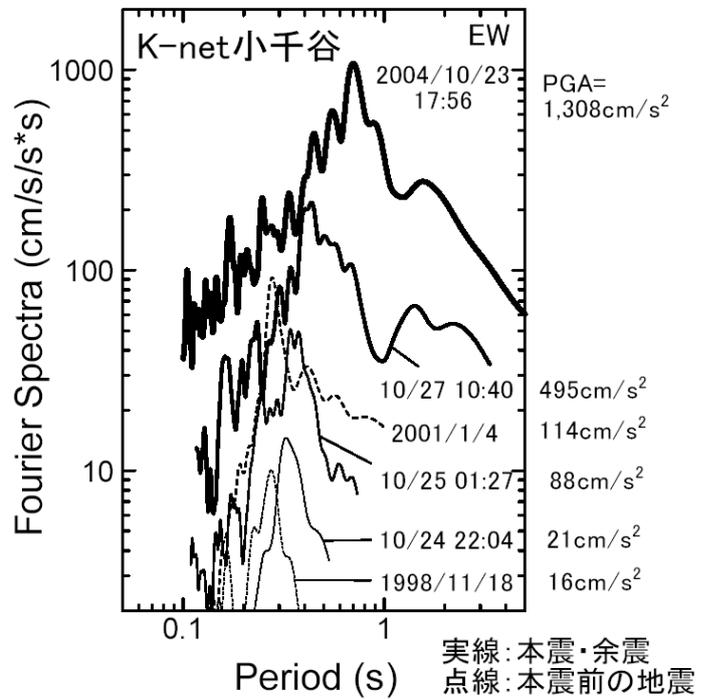


図 12 K-Net 小千谷における本震と前震・余震記録のフーリエ振幅<sup>13)</sup>

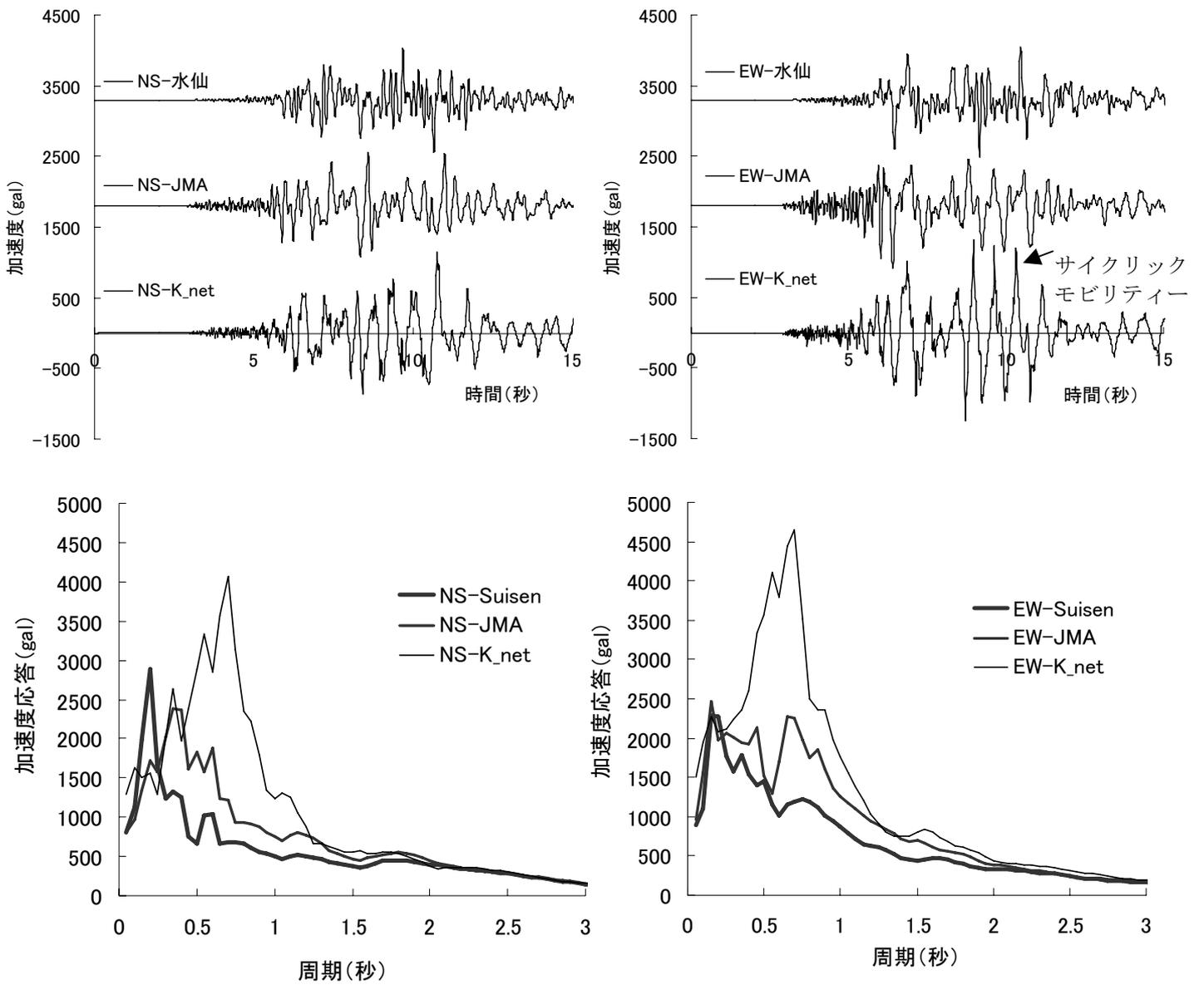


図 13 小千谷市における本震の加速度波形(上)と加速度フーリエ振幅スペクトル(下、 $h=0.05$ )の比較(観測点位置は図 10 を参照)