

## 2007年新潟県中越沖地震における砂丘内陸側緩斜面上の地すべり災害と 庄内平野での災害予測・防災

川辺孝幸\*・風岡修\*\*

### はじめに

2007年7月16日午前10時13分に、新潟県中越沖の北緯37.55683度、東経138.60950度、深さ16.75kmで発生したM6.8の2007年新潟県中越沖地震によって、新潟県柏崎市～刈羽村を中心に、家屋の倒壊や斜面崩壊などの被害が発生した。地震は、マグニチュード6.8で、北緯37.5°、東経138.6°、深さ約17km（気象庁、2007）の震源位置で発生したが（図1），とくに、震央から10数kmの近距離に位置する東京電力柏崎刈羽原子力発電所では、設計時の2.5倍を超える強振動によって、原子力発電所内の各施設で被害が発生したが、原子力発電所は現在も停止したままで再開のめどはたっていない。

筆者らは、柏崎市東部～刈羽村において、被害と表層地質および地震動との関係についての調査をおこなった。調査で明らかになったことは、被害はおもに強振動と表層の液状化および、強震動方向に面した斜面での引張強度（引っ張り強度）のほとんどない未固結砂などの地震動の慣性力による破断・地層破壊による地すべり・斜面崩壊によって起きていることがわかった。強震動の被害は、表層地質の条件にあまり左右されずに、基本的には強度の低い構造物で起きている。これに対して、液状化による地すべりの被害は、旧河道や海岸部の埋立地だけでなく、砂丘の内陸側斜面のさらに内陸側に発達した緩斜面の広い範囲で起きている。また、液状化が起きている場所では、大きな地震のたびに、繰り返し液状化が起きている、ということも明らかになった（風岡ほか、2008, 川辺ほか、2008）。液状化は、地震動によって間隙水圧が上昇して、地層をつくる粒子が単独で周囲の水と一緒に動ける状態になることがあるが、砂丘砂の二次堆積物のようなルーズな表層地質で地下水位が浅い場合には、地震で液状化・流動化しても緩詰めの状態になって、地下水位を下げる対策をしない限り、繰り返し液状化・流動化の被害が発生する可能性が高いことがわかった。その意味では、たとえば日本海中部地震の際に能代市などで液状化・流動化被害が発生しているが、そのような地震の際の被害マップは、次の地震の被害予想マップになり、対策の必要性のある部分を示している。山形県においても庄内平野では全く同じような環境が存在しているが、過去の地震の際の被害分布を基本に、液状化被害の対策が講じられることが望まれる。

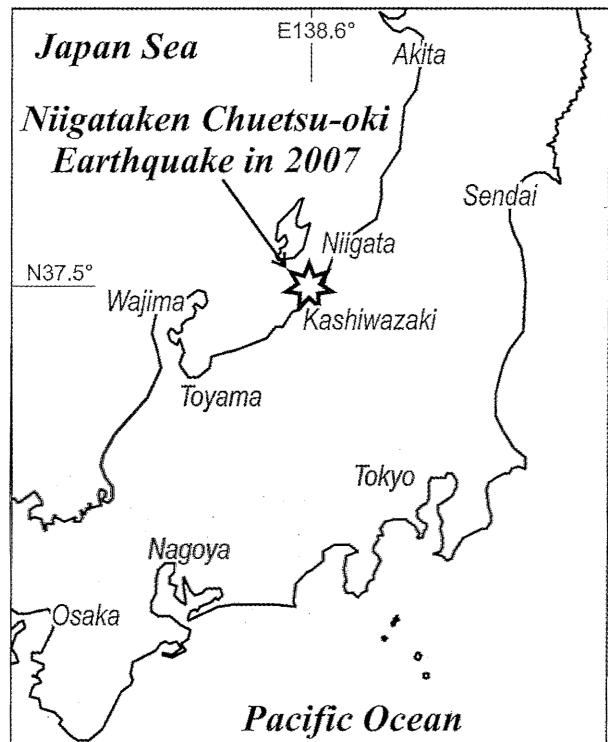


図1 2007年新潟県中越沖地震の震央位置

本論文をまとめるにあたっては、千葉県環境研究センター吉野邦雄・笠原豊・吉田剛の各氏、山形大学地域教育文化学部芦野愛美・岸沙織・黒木渉・奥山明洋・高藻真理・竹内敦実・宇留野元徳・渡辺真弓の各氏と共におこなった2007年新潟県中越沖地震の調査結果の一部を使用した。鶴金沢総合コンサルタンツ本田康夫氏には、山形県における液状化にかかる文献の情報を提供していただいた。古今書院には、庄内平野水害・地盤液状化予測地形分類図の引用を許可していただいた。記してお礼申し上げる。

### 柏崎市長崎での液状化被害

図2は、柏崎市長崎における被害分布図である（川辺ほか、2008）。柏崎市長崎は、西側の荒浜砂丘が東側の別山川の沖積平野に面する斜面の末端にあり、緩斜面になっている。表層には非常に淘汰のよい細粒砂が分布しているが、おそらく、図3に示すような地形から、砂丘本体からの飛砂もしくは砂丘斜面の崩壊によって堆積した、砂丘砂の二次堆積物であるとみられる。

この地域の、緩斜面の高い範囲には緩く円弧を描く開口割れ目が発達し、部分的にグラーベン状に陥没している部分もある。これに対して、斜面下部では、噴砂や地形的な

\* 山形大学地域教育文化学部

\*\* 千葉県環境研究センター

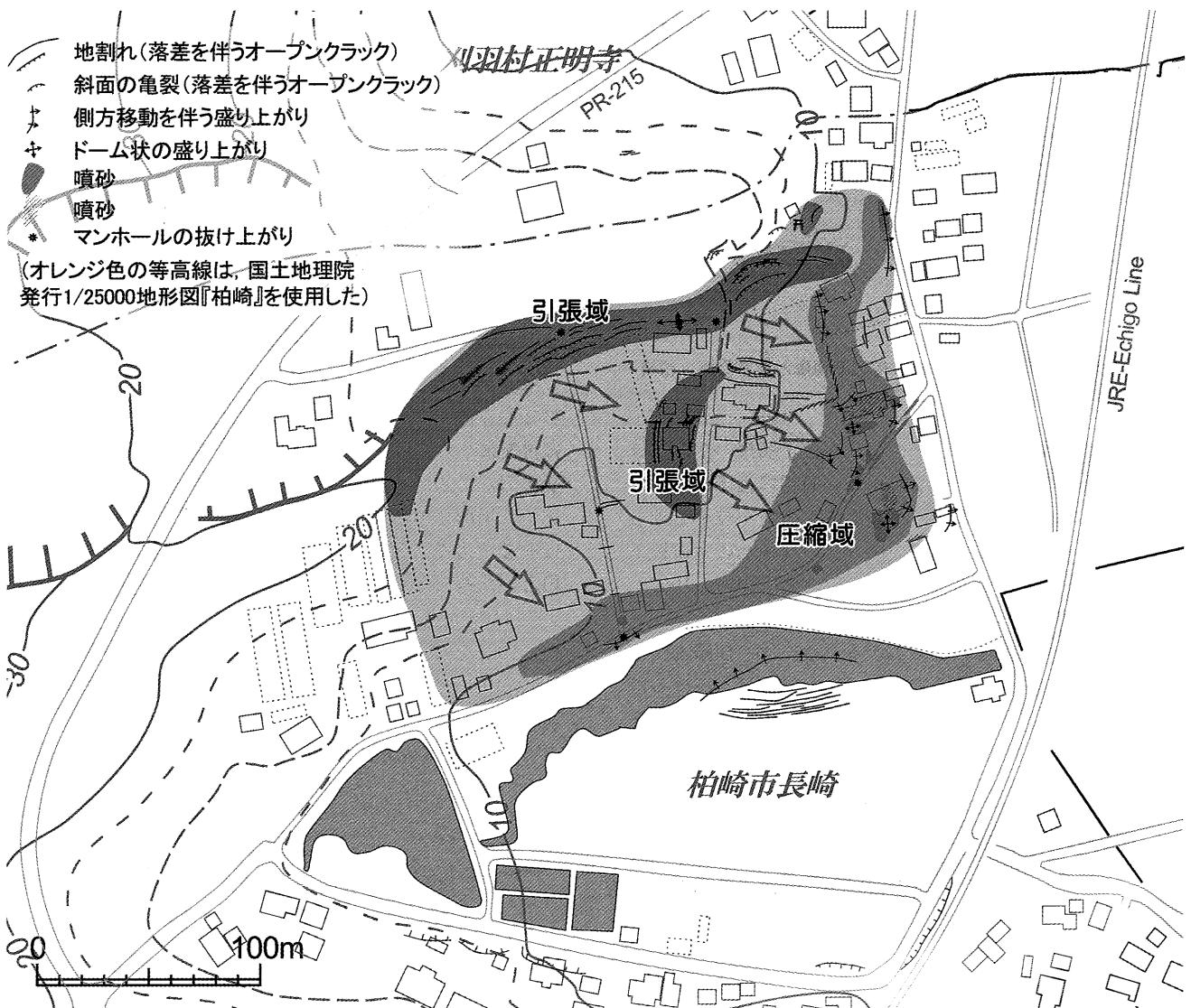


図2 2007年新潟県中越沖地震による柏崎市長崎地区における表層地質の被害状況 (川辺ほか, 2008)  
地形的に高位の部分が引張域に、低位の部分が圧縮域になっている。四角内は簡易貫入試験による調査範囲。

盛り上がりが認められる。斜面下部建つ家屋では、家の周囲が盛り上がっているのに対して、家屋の部分が沈下している。また、斜面方向の道路では、上側が下にのし上げる、“スラスト断層”がみられる。

この範囲の斜面下部において（図2中の四角の範囲）簡易貫入試験をおこなった結果が図4である。簡易貫入試験の結果から、地表下1.3m前後に地下水位の上面があり、その付近にN値の低い部分が、斜面上部では薄く、斜面下部のもともと家屋と畠を境する斜面であり、現在は平坦になっている部分で数10cmの厚さで発達している。

簡易貫入試験からは、地下水位付近で砂層が液状化を起こして流動化し、斜面下部に移動して、もともと畠と住居の境界部にあった斜面の下に移動して、斜面を持ち上げて斜面を無くし家を持ち上げたとみられる。また、液状化・流動化層の上に載る地表までの地層が、ブロックとして斜面下方に移動し、その結果、移動ブロックの斜面上部側に円弧状の開口割れ目をつくったと考えられる。

### 液状化の発生の場

液状化被害については、1964年3月27日にアラスカ州南西部の太平洋に面したプリンス・ウィリアム湾奥で発生したマグニチュード9.2のアラスカ地震の際に、海岸に面したアラスカ州のガードウッドやポーテージなどで壊滅的な地すべり被害が発生し、この調査によって被害が液状化によってたらされたことが明らかにされた (Seed and Wilson, 1967)。また、同じ年の1964年6月16日には、新潟沖の粟島南方沖40km（北緯38°22.2'、東経139°12.7'、深さ34km）を震源として発生した新潟地震によって、新潟市内の信濃川河岸や港湾部において各所で大規模な被害が発生し、日本で始めて液状化の被害が認識されるようになった（新潟大学理学部地質鉱物学教室・深田地質研究所, 1964）。1964年のこの2つの地震とその被害によって、液状化現象の研究が始まった。

液状化は、地震波などの震動によって、地層を構成する

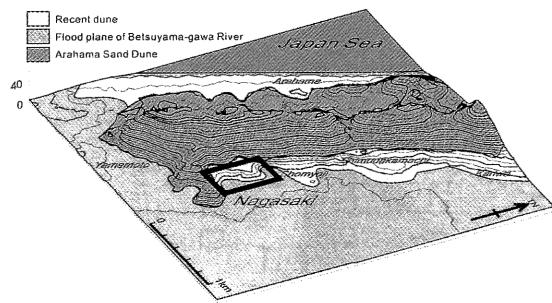


図3 柏崎市北部～刈羽村にかけての微地形と調査範囲（柏崎市長崎）

粒子構成が破壊されて堆積物の体積が粒子間隙の空間が狭くなつて減少するため、その粒子間の間隙に含まれていた間隙水の圧力が上昇するが、その結果、水圧が粒子を押し上げて粒子同士の支え合いが途切れ、間隙水の中に粒子が浮いた状態になることである（Seed and Wilson, 1967；Seed, 1968；吉見, 1980）。

間隙水圧が液状化するまで上がるためには、間隙水圧が上昇し始めてからその間隙水が逃げないで上昇し続けるために、上下が難透水層で囲まれた非排水の条件が必要である。1995年兵庫県南部地震や2005年福岡県西方沖地震の際

には、住宅地の駐車場や舗道の敷き砂が液状化して噴出している（川辺, 1996, 2005）。また、2007年新潟県中越沖地震の際には、砂丘頂部の道路に埋設されたマンホールが、埋積した埋め戻し砂の液状化によって浮き上がっている。このように、液状化が発生するためには、空間の大小や、間隙水圧を封じ込める原因に関わらず、粒子サイズが動くことのできる大きさ以上の空間であれば、間隙水圧が上昇できる条件があればよい（Lee and Seed, 1967；伯野, 1997；風岡ほか, 1997；川辺ほか, 2005）。

#### 同じ場所で繰り返す液状化・流動化

液状化は上記のように地層をつくる粒子の構成が破壊されておこる。液状化したあとには、間隙水が抜けるとともに再配置されて締まりが良くなると考えられていた（Seed and Lee, 1966；吉見, 1980）。しかし、実際には、液状化した場所でのトレンチ壁面の観察では、液状化した部分は非常に締まりがわるく、けっして再配置によって締まりのよい状態になっておらず、周囲の液状化していない部分より締りが悪いことが明らかになっている（風岡ほか, 1989）。また、以前の地震で液状化した場所は、繰り返し液状化を起こしていることが、日本海中部地震の被害調査をはじめ（陶野ほか, 1983；陶野, 1986；若松, 1989など）、千葉県東方沖地震、今回の2007年新潟県中越沖地

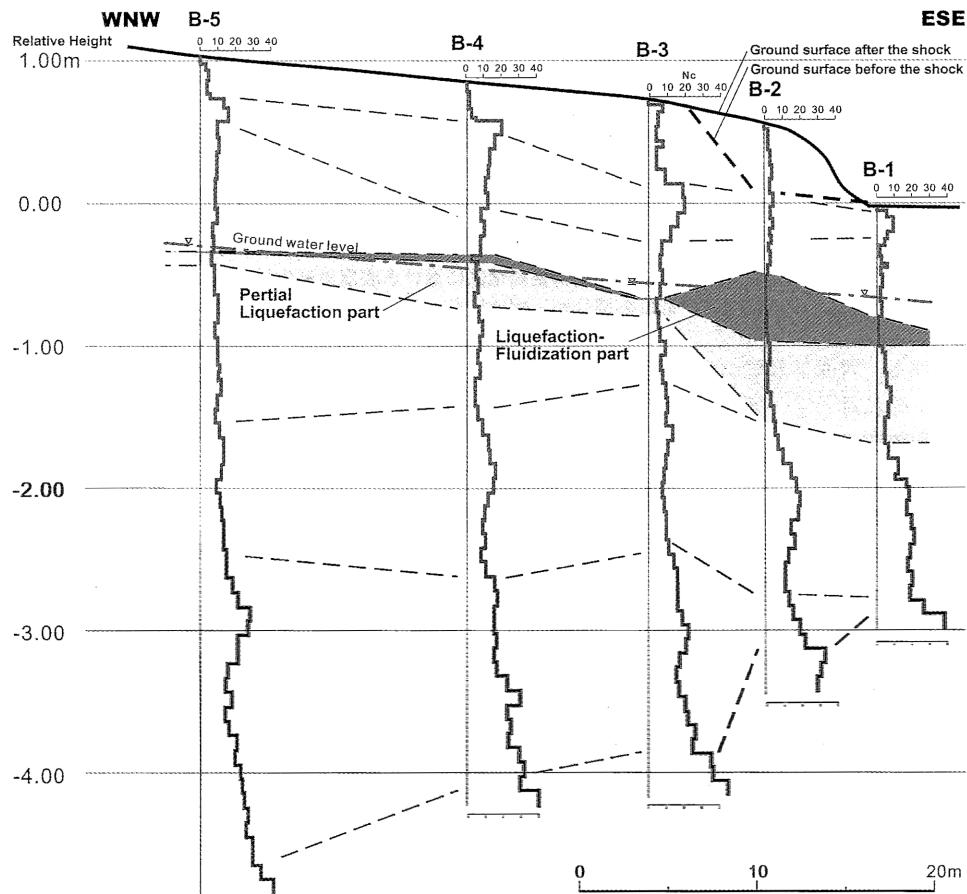


図4 2007年新潟県中越沖地震による柏崎市長崎地区における“地すべり”地における簡易貫入試験結果断面は北西～南東方向（風岡ほか, 2008）

震などで確認されている。

したがって、過去の液状化被害の調査結果は、そのまま、今後に起こりうる地震の際の液状化被害の予測図になる。

液状化した部分は地層本来の内部堆積構造が壊れている。また、通常、流動した痕跡を残している。過去の地層の断面でいえばコンボリューションの内部構造のような状態である。したがって、不攪乱のコアチューブによるボーリングコアなら、N値と合わせた観察で識別は可能である。

間隙水圧の上昇によって液状化した部分は、静的に間隙水圧が抜けるのを待つではなく、地震動によって揺すられて激しく動き、液状化した部分の上位の、“浮いた状態”の非液状化層もまた、地震動に反応して独自の運動をおこなう。このような状態で、液状化した部分ではますます間隙水圧が高まり、周囲の弱い部分を取り込んで成長し、弱い部分を求めて移動して、ついには、上位の地層にできた割れ目を突き破り、地表に達すれば噴砂として噴出する(風岡, 2003)。このような段階では、間隙水圧が粒子を支える液状化の状態から、水と粒子が渾然一体の粘性流体として運動する流動化の状態になる。地震動がおさまって、しだいに間隙水圧が低下するとともに、液状化した部分は流動化の状態を保ったまま、フリーズする(川辺ほか, 2005)。

図5は、山辺町と山形市を境する須川の左岸、山辺町側から流れ込む擂鉢沢川の河岸に露出している古い須川の堆積物中(堆積年代は未詳)に見られる液状化・流動化の跡である(川辺ほか, 2005)。この堆積物は、昔の須川が蛇行してつくったポイントバー上のシートチャネルの堆積物で、洪水の際にポイントバーを覆って流れる流れに浮流として含まれていた細粒砂とシルト～粘土が、互層をつくってシートチャネル上に堆積したものである。このう

ち、砂層の部分が地震動によって液状化・流動化して、上位のシルト部分をブロックとして取り込んでいるが、大小のブロックは、砂の中に基質支持で、個々のブロックが浮いた状態で入っている。また、液状化した部分の上位のシルト～粘土層の下底は、波長数十cmの規則的なうねりをつくっている。この露頭は、毎年、出水時ごとに削られて数10cm位ごとに後退し、現在では当時の露頭から約5m後退している。この間、上位の地層の途中まで伸びている噴砂脈はいくつかみられたが(図5)，完全に突き破って噴出した噴砂の痕跡は見られていない。したがって、この液状化した部分は、閉じた空間の中で地震動に励起され、上昇した間隙水圧を保ったまま、固有の震動をおこなったとみられる。このような大小のブロックを含んでの運動の状態がフリーズした結果として残されている。

このように、液状化した部分では、地震動が収まるとともに、間隙水圧が低下するとともに、静的に粒子が沈下して粒子同士の接触が高い状態で沈積するのではなく、動的に運動した粘性流体が、震動の減少と間隙水圧の低下のある段階で、急激に動けなくなって、直前までの状態をフリーズするとみられる。その結果、運動状態の緩る詰りの状態をそのまま保存する。地下水位が高い状態で再び地震動を被れば、その部分は再度、液状化することになる。

#### 庄内平野における地震時の液状化の可能性

庄内平野の日本海側には庄内砂丘が発達し、その内陸側斜面は、2007年新潟県中越沖地震で液状化被害を被った、砂丘地内陸側の緩斜面と同様な状況にある。

同様な環境の場での液状化は、1983年日本海中部地震の際の藤田(1983, 1986), 陶野ほか(1983), 若松(1983),

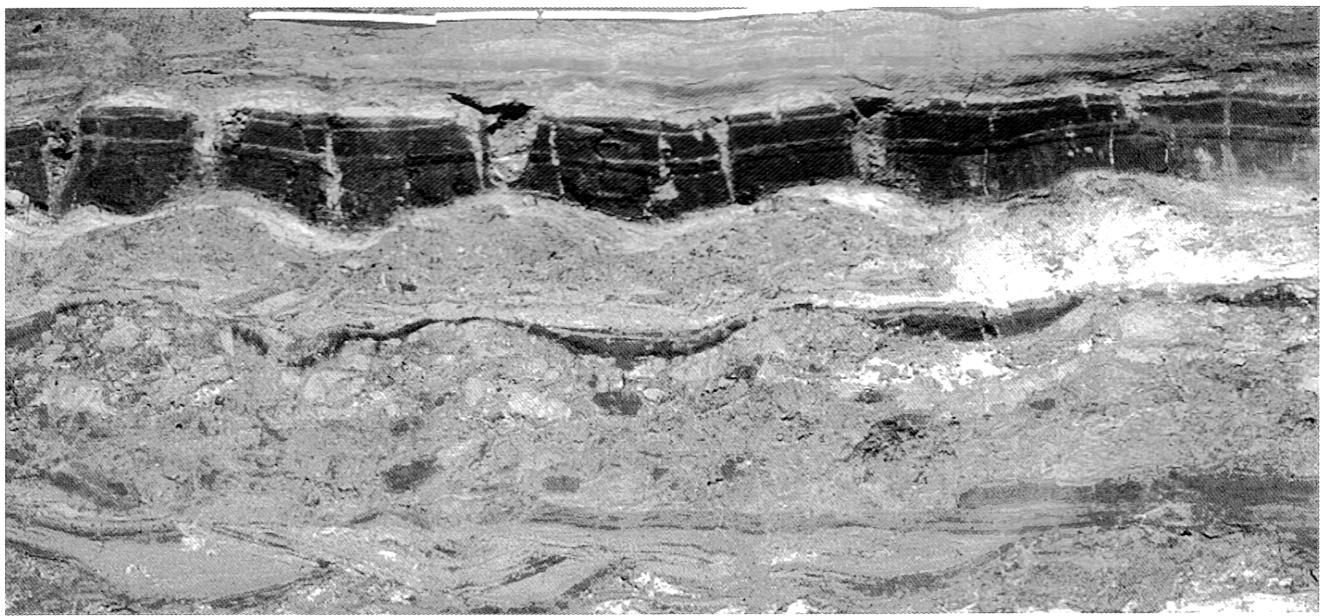


図5 山辺町大門の須川と擂鉢沢川の合流部手前の擂鉢沢川左岸にみられる昔の須川のポイントバー上のシートチャネル堆積物にみられる液状化・流動化の跡

2層で液状化している様子がみられ、それぞれの液状化層は、液状化しなかった上位層を大小のブロックとして取り込んでいて、上位層の下部を波状に変形させている。下位のものは上位の地層に削られていて、下位の液状化が起こったあと、上位の液状化を起こした砂層～粘土層が堆積後に、再び液状化が起こったとみられる。

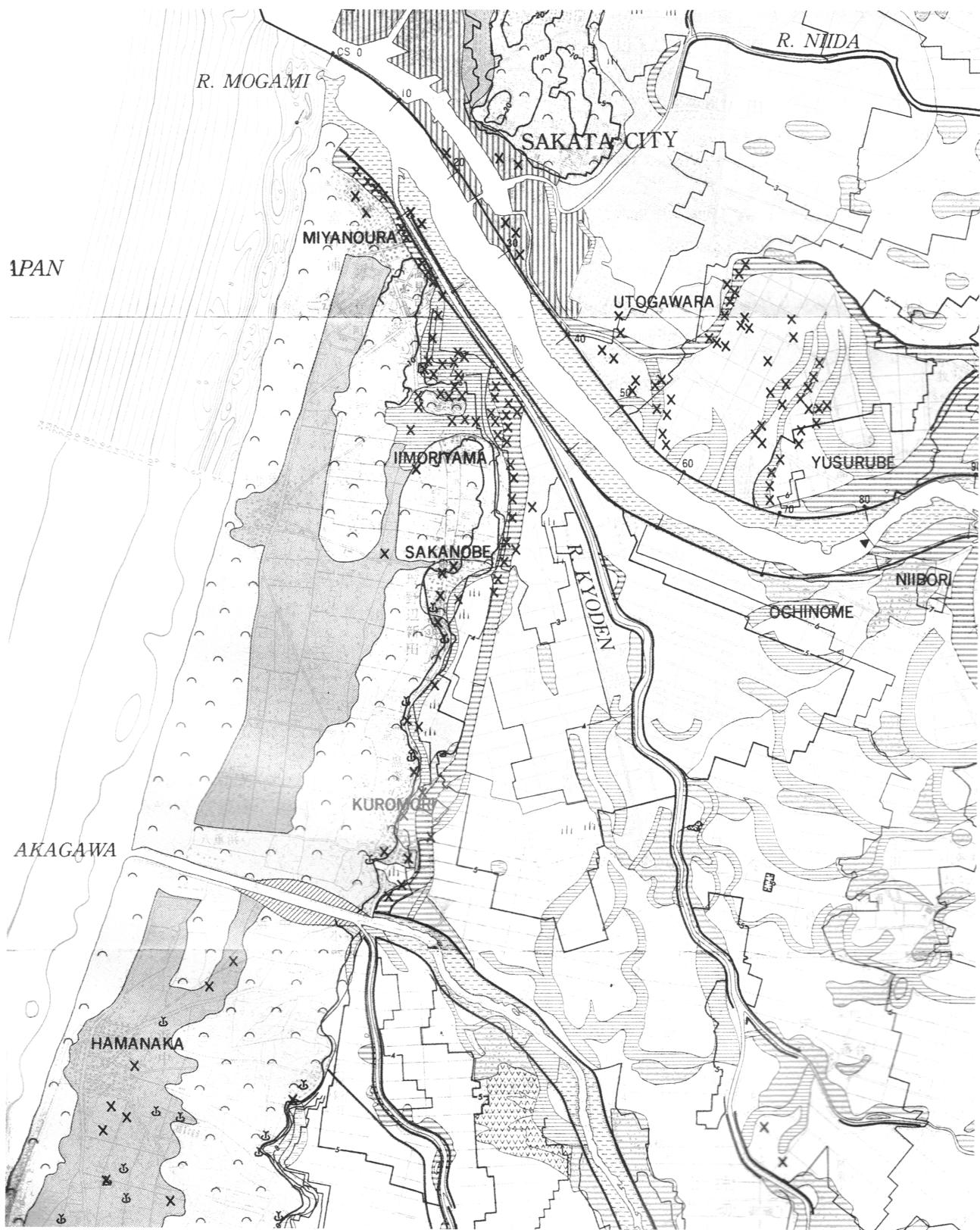


図6 大矢ほか(1989)による「庄内平野水害・地盤液状化予測地形分類図」(一部分)

×印は1983年の日本海中部地震の際に液状化した場所を示す。このような場所では、今後の地震時において、液状化を起こす可能性が高いことが示されている。

白石(1984), 陶野(1986), 日本海中部地震(1983年)秋田大学地質調査班(1986), 1991年千葉県東方沖地震の際のKazaoka et al. (1992), 風岡(1993), 風岡(2003), 兵庫県南部地震の際の藤田ほか(1996)などによって指摘さ

れている。

したがって、現在、地震の空白域といわれる山形県沖を震源として、2007年新潟県中越沖地震と同様な地震が起こる可能性があるが、実際に起こった場合には、柏崎市～刈

羽村にかけての地域でおこった液状化・流動化に伴う緩斜面における“地すべり”被害が発生する可能性が高い。

庄内平野では、すでに、1983年の日本海中部地震後に、同様な観点から、日本海中部地震において液状化した地点の記載と地形分類による被害予測を踏まえた、地盤液状化の予測地形分類図が作成されている(図6; 大矢ほか, 1989, 若松, 1989)。この図は、空中写真判読を中心に描かれた図であり、実際に液状化をおこした地質の状況は記載されていないが、現場で工事を行う際には、十分に考慮しておこなう必要がある。また、実際に現場でボーリング等をおこなう際には、コアチューブなどで、なるべく不攪乱の資料を採取し、堆積構造を観察することで、N値の結果と合わせて液状化層の識別は十分可能である。

いずれにしても、このような場所では、来るべき地震に備えて、液状化被害の可能性を考慮した構造物の建設と、地下水位を下げるような暗渠や間隙水圧を逃がす井戸などのドレンの設置などによって、液状化しにくい地質環境を整備しておく必要がある。

## 文 献

- 秋田大学：日本海中部地震災害（1983年）秋田大学地質調査班（1986）1983年日本海中部地震による地盤災害と表層地質。地質学論集, 27, 237–256.
- 藤田至則（1983）噴砂現象の規則性とその成因－日本海中部地震における秋田県若美町、秋田港における噴砂災害－。新潟大学災害研年報, 5, 5–70.
- 藤田至則（1986）傾斜する地下水面上に起因する亀裂・噴砂・崩壊等の地質災害。地質学論集, 27, 95–108.
- 藤田至則・川辺孝幸・角田史雄・山岸猪久馬・熊井久夫・高野武男・野村 哲・野田貴洋・齊藤明郎・齊藤辰馬（1996）芦屋川流域の市街地における地震災害－液状化被害の防災に関する提言－。柴崎達雄・植村 武・吉村尚久編『大震災－そのとき地質家は何をしたか－』, 東海大学出版会, 43–68.
- 川辺孝幸（1995）1995年兵庫県南部地震における盛土地すべりの例－明石市朝霧山手町の地すべり災害－。山形応用地質, 15, 17–23.
- 川辺孝幸（2005）2005年福岡県西方沖地震の被害と表層地質との関係について。地質汚染－医療地質－社会地質学会誌, 1, 51–55.
- 川辺孝幸・大塚哲央・奥山博文（2005）山形盆地中央部のシートチャネルを埋積する洪水堆積物中の液状化現象。日本地質学会第112年学術大会講演要旨, 277–277.
- 川辺孝幸・風岡修・笠原豊・古野邦雄・吉田剛・岸沙織・黒木渉・奥山明洋・高藻真理・竹内敦実・宇留野元徳・渡辺真弓・吉田剛（2008）2007年新潟県中越沖地震による砂丘は以後の大規模“地すべり”について。東北地域災害科学研究, 40, 231–234.
- 風岡修・楠田隆・榎井久・佐藤賢司・鈴木一男・BATU

Ungkap Lumban・風戸孝之・香村一夫・原雄・古野邦雄（1989）1978年千葉県東方沖地震時に液状化した地層－液状化の実態、千葉県石納の例－。日本地質学会第96年学術大会講演要旨, 657–657.

Kazaoka O. et al (1992) The Process from Occurrence to Expansion of Liquefaction-Fluidization at Earthquake. 29th IGC Abstracts, 1, 79.

風岡修（1993）地質環境調査の例－液状化・流動化を中心－。地学団体研究会第40回総会シンポジウム要旨集, 91–98.

風岡修（2003）液状化・流動化研究のはじまり。アーバンクボタ, 40, 2–3.

風岡修・川辺孝幸・古野邦雄・笠原豊・岸沙織・黒木渉・奥山明洋・高藻真理・竹内敦実・宇留野元徳・渡辺真弓・吉田剛（2008）2007年中越沖地震の際の液状化－流動化被害調査結果－柏崎市長崎での液状化－流動化被害調査から－。第17回環境地質学シンポジウム論文集, 29–34.

Lowe, D.R. (1975) Water escape structures in coarse-grained sediments. Sedimentology, 22, 157–204.

内藤信明・丹尾貴志・高濱信行・新潟大学調査団墓石被害調査チーム（2005）中越地震の異常震動帶－墓石被害調査－。新潟県連続災害の検証と復興への視点－2004. 7. 13水害と中越地震の総合的検証－, 64–71.

新潟大学理学部地質鉱物学教室・深田地質研究所（1964）新潟地震地盤災害図1:3000, 6 sheets.

大矢雅彦・古藤田喜久雄・若松加寿江・久保純子（1989）庄内平野水害・地盤液状化予測地形分類図。大矢雅彦・木下武雄・若松加寿江・羽鳥徳太郎・石井弓夫著「自然災害を知る・防ぐ」付図, 古今書院。

Seed, H. B. and Wilson, S. D. (1967) The Turnagain Heights landslide, Anchorage, Alaska. Jour. Soil Mech. Found. Div. ASCE, 93, 325–353.

Seed, H. B. (1968) Landslides during earthquakes due to soil liquefaction. Jour. Soil Mech. Found. Div. ASCE. 94, 1053–1122.

白石建雄（1984）1983年日本海中部地震による秋田県若美町北部の地盤現象。秋田大学教育学部研究紀要（自然科学）, 34, 139–151.

陶野郁雄・安田進・社本康広（1983）日本海中部地震による液状化災害。基礎工, 11, 125–131.

陶野郁雄（1986）液状化現象からみた砂質堆積物の物理的・堆積学的特徴。地質学論集, no. 27, 15–42.

若松加寿江（1983）地震災害と地形分類図。大矢雅彦編「地形分類の手法と展開」, 附図。

若松加寿江（1989）庄内平野水害・地盤液状化予測地形分類図について。大矢雅彦ほか著「自然災害を知る・防ぐ」, 227–233.

吉見吉昭（1980）砂地盤の液状化。技報堂出版, 5–8.