

第2007-05号

GISを用いた地形改変地の震災土地条件 評価

山形大学 地域教育文化学部
准教授 村山 良之

平成20年9月

目次

1. はじめに	2
2. 分析方法と解析システム	14
3. 判別モデルの構築 ー神戸と釧路ー	24
4. モデルによる予測の試み ー柏崎と東京ー	31
5. おわりに ーまとめと課題ー	33
謝辞	36
文献	36
英文要旨	40
図表	41
研究者紹介	96

1. はじめに

1. 1 問題の所在

日本における近世以降の都市は、広い後背地を控えて交通も便利な平地に形成され、このことが近代における都市発展の基礎になったとされる（矢嶋，1956）。1960年国勢調査で初めて人口集中地区（DID）が設定されたとき、その地形ごとの面積が測定され、低地 68.0%、台地 23.9%、丘陵 4.4%等であること、すなわち日本の実質的都市域の大部分が平地（低地と台地）に立地することがおそらく初めて数字で明らかにされた（齋藤，1965）。ところが、日本ではちょうどこのころから急激な都市化が進行し、とくに 50ha 以上の大規模な住宅開発地の地形ごとの面積比をみると、丘陵が 1960 年代後半から 70 年代を通じてほぼ一貫して 40% を占めるにいたった（田村，1982；田村他，1983）。つまり、この時期日本の都市域は、大規模な住宅地開発が進められた大都市周辺部を中心に、丘陵地にも急激に拡大し、地形改変による住宅地（造成宅地）を急激に蓄積した¹。

一方、地震によって住宅等の建物が被災にいたるプロセスをみると、建物そのものの堅牢度とともに、土地条件（地盤条件）が強くこれに関わることは、数多くの経験と研究が明らかにしてきたところである。そして、近年の日本における地震災害をみると、ほとんどの場合、丘陵地等に展開する住宅地を中心とする地形改変地で被害が発生している。つまり、現在の日本において、このような地形改変地の地震に対する土地条件の把握は、重要な課題である。

1. 2 地形改変地の地震被害の特性

地形改変による住宅地の地震災害が最初に注目されたのは、仙台を襲った 1978 年宮城県沖地震であり²（田村他，1978；田村，1979；東北大学理学部地質古生物学教室，1979；小林他，1980；村山，1980；阿部・村山，1982；村山，1994 等），1993 年釧路沖地震や 1994 年北海道東方沖地震では釧路，中標津，根室等が被災し（柳沢他，1993；菅野他，1993a；菅野他，1993b；村山他，1994；若松他，1994；笠原，1995 等），1994 年三陸はるか沖地震では八戸の郊外住宅地が被災した（村山，1996；堀田，1996；国土地理院，1996；杉村，1998 等）。1995 年兵庫県南部地震では、神戸周辺に広域に展開する造成宅地に多くの被害が発生し、

1 その後このような研究は認められないが、正井・佐藤（1982）は、1975 年 DID 面積のうち低地が 63.5%という数値を報告した。丘陵地に関する数値は示されていないが、低地の割合は 1960 年よりも少し下がったことがわかる。

2 宮城県沖地震の 10 年前 1968 年十勝沖地震の際に、札幌市清田団地で同様の被害が発生していたことが、田村（1979）で紹介され分析されている（後述）。ただし、広く衆目を集めたのは宮城県沖地震が最初であり、十勝沖地震の被害はその際に「再発見」されたともいい得る。

京都でも被害が認められた（村山他，1995；釜井他，1996；横田・仲津，1996；藤岡，1996；植村，1996等）。2001年芸予地震では呉，広島とその周辺が被災し（村山・藤原，2001；藤原，2002b等），2003年十勝沖地震では札幌の住宅地や十勝の農地等が液状化を伴って被災し（2003年十勝沖地震地盤災害調査委員会，2004），同年5月の宮城県沖および7月の宮城県北部の地震でも，同様に住宅地だけでなく造成農地も被災した（村山，2004；平野他，2004等）。さらに2004年新潟県中越地震と2007年新潟県中越沖地震では，それぞれ長岡と柏崎の一部の郊外住宅地が激しく被災し（釜井他，2005；村山，2005等），2005年福岡県西方沖の地震でも特徴的な被害が発生した（村山・黒木，2006）。

これらのうち，筆者が直接調査したもののみを取り上げて，既発表論文等をもとに以下にまとめることとする。

1. 2. 1 1978年宮城県沖地震³

1978年6月12日に発生した宮城県沖地震は，マグニチュードが7.4，宮城県沖を震源とするプレート境界型の地震である。被害は宮城県を中心に，死者28名，負傷者1,325名，全壊1,183棟，半壊5,574棟に上った（理科年表）。仙台の震度は5と発表されたが，市内でも気象台のある台地に比べて低地ではこれよりずっと強い地震動であった。

この地震は，広大な郊外住宅地を有する仙台都市圏を襲い，ここに大きな被害をもたらした。なかでも，従来から指摘されてきた低地部だけでなく，丘陵地の地形改変地にも被害が集中し（図1），これが広く注目された最初の事例となった。

地形改変地の被害は，地形改変の規模によって特徴的なものとなった（図2）。図のAは，全体的に自然の斜面の形を残しながら，小規模な切土・盛土を行ったもので，いわゆるヒナ壇型の造成によるものである。改変地全体の傾斜が大きく，宅地の一筆ごとに高い擁壁（その多くは練玉石積）を伴っている。これらの擁壁に亀裂やはらみさらには崩壊が生じ，その敷地の建物の基礎が割れたり建物が傾斜したりする等の被害が発生した（図3a, b）。このタイプでもっとも大きな被害が発生した緑ヶ丘では，原地形が急傾斜であり，かつ改変地内に小規模な開析谷があったため，そこに局所的に厚く盛土した部分では，とくに崩壊を含む大きな被害が発生した（図2A', 図3c）。

一方，図2のBとB'は，大規模な切土・盛土によって，造成後はほぼ平坦になっているタイプである。このタイプでもっとも被害が大きかった泉市（当時）南光台とその周辺についてみていきたい。図4は，現地調査等に基づいて作成した被害分布であり，図5は，そのうち

³ 村山（1980），阿部・村山（1982），村山（1994）に基づいてまとめたものである。以上の文献については，引用を示さない。

被害の著しい家屋と全壊指定の家屋のみ当時の等高線とともに示したものである⁴。いずれも地形改変前後の地形図（1/10,000）の等高線の変化から推定した切土・盛土境界線とともに示している。それによると、切土部に被害が少ないこと、切土・盛土境界部にとくに激しい被害が集中したことがよくわかる。これらの被害家屋は、基礎が割れたりさらにわずかに傾斜したりしたものが多く（図 3d, e）。埋設管の被害も境界部に集中した。盛土が沈下または移動したこと、切土部と盛土部で異なる地震動が生じたことによると考えられる。このタイプに特徴的なもう一つの被害形態として、大規模な平坦化に伴って改変地の縁辺部（谷埋め盛土の末端部）に形成された盛土の崖（斜面、法面）に生じたものがある（図 2 の B）。白石市寿山団地ではかつての谷と溜め池を埋めた比高約 25m あまりの盛土の崖（斜面）に大規模な崩壊が発生した。ここまで大規模なものではなくとも、盛土の崖（斜面）のはらみ出しに伴う直上部の被害が複数の団地で認められた。

このような被害の様式は仙台周辺の他の改変地にも共通するが、被害の程度の差は大きい。その差を考える 1 つの試みとして、新しい住宅団地には墓地がないため、家具の転倒状況の聞き取り調査に基づいて地震動の強さを推定した。図 6 は、3 つの団地において切土部、盛土部ごとに家具の転倒状況を示したものである。団地によっては盛土部の方で震動が大きい傾向が認められるが、それ以上に団地間の差が大きく、とくに南光台では震動が大きいことが判明した。その理由は明らかではないが、聞き取りによると南光台にも震動が小さい家もあり、地形改変前後の標高の変化から推定したよりも盛土部の広がり大きい（造成の際に大きく切ってから盛り直した）こと等が推測される⁵。

1. 2. 2 1993 年釧路沖地震⁶

1993 年 1 月 15 日に発生した釧路沖地震は、マグニチュードが 7.5、震源は太平洋プレート内で発生した地震であり、釧路市を中心に、死者 2 名、負傷者 967 名の人的被害（理科年表）をもたらした。釧路の震度は 6 と発表されたが、短周期が卓越するために気象台のある段丘の方が低地よりも強い地震動に襲われた。被害も、開析の進んだ段丘に開発された住宅地に集中した。

なかでも、緑ヶ岡とその周辺はもっとも被害が大きく、緑ヶ岡、材木町、武佐では崩壊も発

4 被害調査は、菅沼健、村山良之、齋藤曜一、吉永秀一郎（当時東北大学学生）による。

5 土工量ひいては工事費を抑えるため、切りすぎた部分に盛り直すことは敬遠される。ただし、微細な起伏の修形等のため、切土部でも多少の盛土が行われるのがふつうである。

6 柳沢他（1993）、村山・菅野（1994）に基づいてまとめたものである。以上の文献については、引用を示さない。全般についてのより詳細な記載は後述する。なお、現地調査は、村山良之および菅野高弘（当時東北大学工学研究科）による。

生した。地形改変前後の大縮尺地形図によると、これらの崩壊はいずれも谷埋め盛土の末端の斜面で発生したことがわかった（図 7a～c, 図 8～10）。武佐のわかき幼稚園付近では複数の崩壊またはすべりによる変状が複数認められたが、これらもことごとく盛土斜面である。緑ヶ岡地区の崩壊地周辺やこれより東南方の桜ヶ岡地区（桜ヶ岡, 益浦等）における現地調査の結果, 路面の亀裂や宅地の不同沈下, それに伴う家屋の傾斜等が数多く認められ, これらが切土・盛土境界部で発生したことを見出した（図 7d～g）。図 11 は, 釧路市が作成した家屋被害分布図に, 新旧地形図（新 1/2,500, 旧 1/3,000, いずれも 2m 間隔等高線）をもとに手作業で求めた切盛境界推定線を書き加えたものである。家屋被害が切土部にほとんどなく, 盛土部や境界部に多いことが明瞭である。このような被害分布は埋設管も同様で, 緑ヶ岡地区におけるガス管の被害のうちとくに大規模な掘削を要した 4 地点はいずれも盛土部で, このうち 3 地点は切土・盛土境界付近であった。同じ市内の地形改変地でも, 桜ヶ岡地区は緑ヶ岡地区よりも被害が少ない。しかしその被害分布は切土・盛土境界部に集中しており, 分布傾向は似通っているといえる。

1. 2. 3 1994 年三陸はるか沖地震⁷

1994 年 12 月 28 日に発生した三陸はるか沖地震は, マグニチュード 7.6, プレート境界を震源とする地震である。翌年 1 月 7 日にマグニチュード 6.9 の最大余震があり, 震源が近かったため, これも被害を拡大した。八戸の震度はそれぞれ 6 と 5 であった。被害は八戸市を中心に, 死者 3 名, 負傷者 788 名, 全壊 72 棟, 半壊 429 棟に及んだ（理科年表）。

地震波は短周期成分が卓越していたため, 被害は低地よりも段丘（台地）上に集中した。堀田（1996）や国土地理院（1996）は, 段丘上の被害の集中地について地形をもとに 3 つに分類した。ア：段丘（台地）の浅い谷（開析谷）, これより上位の段丘上のイ：谷頭部およびウ：段丘崖（斜面）である。段丘上には軟弱な火山灰層が堆積しており, アの浅い谷状の地形はかつての開析谷を火山灰が埋積したところとくに厚くなっている。八戸の中心市街地でひどく被災したビル群はこのような地形に位置する。そしてイ, ウも全体が火山灰に覆われて, その形状は緩斜面をなしている。八戸の周辺に位置するこのような地形のところに住宅地が展開し, ここに多くの家屋被害が発生した。この他に, 上記の仙台や釧路の事例と同様に谷埋め盛土末端の斜面が崩壊した住宅地の事例が 1 箇所ある（図 12a）。

上記のイ, ウの事例として, 地形改変前後の大縮尺地形図が入手できた S 地区についてや

⁷ 村山（1996）に基づいてまとめたものである。この文献については, 引用を示さない。現地調査は村山良之の他, 松本秀明（当時東北大学理学研究科）, 川口祐輔, 平出雅彦（当時東北大学学生）により, 地震後約 2 ヶ月間に, 複数回実施した。

や詳細にみる。堀田や国土地理院は主に 1/25,000 地形図等をもとにしているが、ここでは等高線間隔 2m の 1/3,000 と 1/2,500 縮尺地形図をもとに検討した結果である (図 13)。これによると、比較的広域の造成宅地である図 13 中央南半部および東端部でも、もともとの緩傾斜地や浅い谷部にごくわずかな地形改変を施しただけの造成であり、新旧の等高線から切土・盛土の分布を推定することは不可能である。この図からは、最大で 4m 程度の標高変化しか認められない。地形改変の規模で見ると、これらの団地は図中央北半部のごく小規模な宅造地とあまり変わらない。

家屋被害の状況をみると、高さ 1m 程度、傾斜地で最大でも 3m 程度の擁壁に支えられた盛土が一部沈下して、その上の住宅が全壊や半壊にいたるといった被災形態が多く、なかには擁壁に亀裂や移動・傾斜が認められるものもある (図 12b, c)。地形改変規模は小規模だが、この浅い盛土部分の変状が家屋被害を助長したと考えられ、S 地区以外でも同様の被害を確認した (図 12d)。

これら全半壊の家屋は、旧地形図の水田上 (図 13 の C-3)、あるいは、もとのごく浅い谷状地形や谷頭部 (図 13 の A-2, B-2,3) に位置するものが多く、他は段丘崖 (緩斜面) またはその直上にあたること、新旧地形図からわかる。旧地形の浅い谷状または谷頭部には、軟弱な厚い火山灰層 (場所によってはさらに有機質層) が堆積する機会が多いことから、ここで局所的な増幅が生じたことも考えられる。

段丘上でかつ地形改変もわずかというこれまでの事例からは有利な土地条件と考えられてきた場所で、火山灰層等の存在とわずかな地形改変の組合せが激しい被害を招いた。上述の仙台や釧路とはやや異なる形態の被害を含む事例であるといえる。

1. 2. 4 1995 年兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災) ⁸

1995 年 1 月 17 日に発生したこの地震は、マグニチュード 7.3 のいわゆる直下型地震である。当初は神戸、洲本で震度 6 と発表されたが、後に淡路島から神戸市～宝塚市にかけて震度 7 であることが明らかになった。大都市のきわめて多様な施設が激しく被災し、被害は、2002 年 12 月 26 日現在で、死者・不明者 6,436 名、負傷者 43,792、住家全壊 104,906、半壊 144,274、住家全半壊 6 千以上である (理科年表)。この災害は阪神・淡路大震災と命名された。

神戸の中心市街地とその周辺の激しい被害が衆目を集めたが、六甲山地周辺やその背後の丘陵地等に地形改変を伴ってつくられた住宅地でも、多くの被害が発生した。筆者らは、六甲

⁸ 村山他 (1995) に基づいてまとめたものである。この文献については、引用を示さない。なお本文中の A 団地については後節で GIS を用いて詳細に検討する。

山地背後の神戸市垂水区の丘陵地を中心に、地形改変地の地震被害について調査を行った。その結果、被害の集中した須磨区以東の低地部に比べれば明らかに少ないものの、注目すべき被害が発生した。

神戸市垂水区を全体的に観察して被害分布のおおまかな傾向を把握したうえで、3つの団地を選択した。そして現地調査によって1戸ごとの家屋被害分布図を作成した。調査方法および被害程度の分類は、震災復興都市づくり特別委員会（日本都市計画学会関西支部・日本建築学会近畿支部都市計画部会）になった。この方法は目視によるため、道路側から見える部分しか捉えられない。また、調査日は1995年3月21～25日で、地震発生後約65日にあたるため、既に修理を終えた家屋もある。よって、調査で得た被害分布図よりも、実際の被害の方が大きいと考えられる。目視によれば損傷のない家屋でも、聞取りによると、じつはその基礎が割れているというような事例を、調査中にいくつか確認した。

一方、地形改変の把握は、新旧の大縮尺の地形図から等高線の変化を読み取り、切土、盛土の分布等を推定することが必要である。しかし、新旧の1/25,000地形図（1992年修正測量と1923年測量）しか入手できなかったため、これをもとに手作業で切土・盛土境界推定線を描いた。以下の検討は、地形改変地の土地条件把握にあたって、全国的に入手が容易なこの図を用いることの有効性を試すことにもなる。

図14は、筆者らが観察した団地のなかでは、もっとも被害が激しいと判断されたA団地の被害分布図の一部である。ここでは、仙台や釧路と同様に、宅地地盤の不同沈下等によって建物が被害が及んだものが多い。また、他では認められなかった形態として、複数の敷地にまたがる谷埋め盛土が目視でわかるほど移動（滑動）してそれに載る複数の敷地で不同沈下や亀裂が生じて住宅に被害をもたらしたものもある（図15a～c）。

同様の図を、B団地についても作成し、これらから図16を描いた。ここで境界部とは、上記の方法によって推定した切土部と盛土部との境界線からおおむね20mの範囲内と定めた。また鉄筋コンクリート造の集合住宅等は図16には含まれない。これによると、切土部、盛土部、境界部の順で被害程度がひどくなることが明瞭で、その傾向は両地区に共通する。一方で被害程度は両地区間で大きく異なる。図にはないもう一つの事例地区であるC団地では、これらよりさらに被害程度が軽く被害はほとんど認められないが、切土・盛土境界部とみられる場所では道路アスファルト亀裂等の被害が発生した（図15d）。

なお、A団地の切土部において中程度の損傷以上とされた6棟は、急傾斜地、もとの小規模な谷すなわち盛土の延長方向、小規模な盛土と切土との境界部に位置していることを確認している。これは、1/25,000図による作業の限界を示し、大縮尺地形図による検討が可能になれば、切土部、盛土部、境界部の対比は、より明瞭になるものと考えられる。

切土、盛土の分布が宅造地内の被害分布と明瞭に対応するという特徴は、宮城県沖地震、釧路沖地震でも認められ、地形改変地に共通する地震に対する土地条件を示している。また、この把握にあたっては 1/25,000 地形図による検討が、精度に限界はあるものの、ある程度有効であることも明らかになった。

1. 2. 5 2001 年芸予地震⁹

2001 年 3 月 24 日に発生した芸予地震は、安芸灘の深さ約 50km、フィリピン海プレート内で発生した、マグニチュード 6.7 の地震である。広島県を中心に被災し、死者 2 名、負傷者 288 名、全壊 70 棟、半壊 774 棟であった（理科年表）。

被害は低地で少なく、低地の縁辺部や山麓部が多い。古い埋立地やデルタに載る広島と呉の中心市街地の被害は小さく、その縁辺部から山麓の地形改変地で被害が多い。その理由の 1 つとして、短周期成分が卓越する周期特性を持つ地震であったためと考えられている（藤原，2002a）。

呉市では、急傾斜地での崖崩れが多発した（図 17a, b）。古くから傾斜地に住宅地が展開している呉市では、その古い石積みの擁壁の崩壊が多発し、自動車等の走行ができない小幅員道路や階段にのみ接道する宅地も多く、復旧に手間取った。

広島市郊外の山麓部における地形改変地では、藤原の調査によると、盛土部や切土・盛土境界部、崖の直上で瓦屋根の被害が多い。また切土・盛土境界部や盛土の崖地で、擁壁の亀裂や盛土の沈下等を伴った家屋被害が、ごく少数であるが認められた（図 17c, d）。図 18 は、安佐南区のある住宅団地における、新旧 1/25,000 地形図から推定した地形改変と、道路や宅地の地盤変状箇所および家屋の基礎等の被災箇所を重ねたものである。被害が切土・盛土境界付近に集中していることが明瞭である（図 17e, f）。

この地形改変地の被災について、宮城県沖地震、釧路沖地震、兵庫県南部地震による事例と比較すると、呉市を除くと全体的として被害はかなり少なく、被害程度も軽いが、被害様式は過去の事例と共通することがわかった。

1. 2. 6 2003 年宮城県北部の地震¹⁰

2003 年 7 月 26 日に発生したこの地震は、陸域の逆断層型の地震で、マグニチュードが 6.4、

9 村山・藤原（2001）に基づいてまとめたものである。この文献については、引用を示さない。現地調査のうち呉市とその周辺は、前空秀明（広島大学）との共同による。

10 村山（2004）、平野他（2004）に基づいてまとめたものである。この文献については、引用を示さない。

また同日に前震(M5.6)と余震(M5.5)も発生して、震源域直上では3回たてつづけに震度6弱以上に見舞われた。地震としての規模大きくないが、震源が浅いため局所的に激しい被害をもたらし、負傷者677名、全壊1,276、半壊3,809に及んだ(理科年表)。

以下では、筆者らが地震直後に現地調査した震源直上の旭山丘陵周辺の2地区の被害の特徴をまとめる¹¹。

旧河南町(現石巻市)北村地区:本地区は、丘陵地斜面と谷底に古くから展開する農家を含む集落である。裏山を切って手前に盛土というごく小規模な地形改変による宅地が多く、ここで、盛土部が沈下して建物被害に及んだものが多く、なかには盛土部の崩壊にいたったものもある(図19a~c)。

建物被害程度は、建築年代と地盤変状の有無によって強く規定されることが明らかになった(図20)。調査総数224棟(うち2棟は解体済み)についてみると、1971年以前建築の古い建物は、建物直下の地盤変状を伴う建物では2/3が半壊以上の被害を受けたのに対して、地盤変状を伴わないものは90%以上が一部損壊以下で、無被害も20%以上存在する(図19d)。一方、1982年以降の建物は、地盤変状を認めないものでは2/3以上が無被害であるのに対して、地盤変状を伴うものでは30%にとどまる。1972~1981年建築の建物の被害程度はこれらの間である。たとえ古い建物でも、地盤変状がなければ無被害にとどまるものがあるのに対して、新しい建物でも、地盤変状を伴うと無被害にとどまることは難しい。なお、ごくわずかであるが、切土部でも亀裂等が発生したとみられる事例もある。本地域の(風化)半固結砂岩の脆さが関連していると思われる。

旧矢本町(現東松島市)大塩地区:当地区は大規模な地形改変によってつくられた新しい住宅地である。新旧の1/25,000地形図の等高線判読により切土盛土の分布を推定し、これに調査で得られた地震被害分布を重ねた(図21)。道路亀裂や建物基礎亀裂等は、切土部にはほとんど発生せず、盛土部や切土・盛土境界部に集中的に発生したことが明らかである(図2.19e, f)。建物はいずれも建築後数年以内と新しく、半壊以上のものは存在せず、盛土部や切土盛土境界部に一部損壊のものが3棟(調査総数87棟)のみである。

大塩地区における被害分布とその様式は、1978年宮城県沖地震以来、多くの地震で認められてきた、都市郊外の丘陵地等に急速に展開してきた住宅地における土地条件の問題を改めて示した。一方、河南町北村地区では、丘陵地に造成された水田崩壊も発生した。同年5月26日三陸沖の地震の際にも宮城県築館町で同様の崩壊が発生していた。2つの地震は、造成農地と傾斜地の古くからの集落の被災という、それまでほとんど見過ごされてきた地形改変地の課

11 筆者らは、日本建築学会の災害調査ワーキンググループ(WG)に調査設計段階から参加し、とくに筆者らのグループでは地盤変状にも注目した。

題を浮かび上がらせた¹²。

1. 2. 7 2004年新潟県中越地震¹³

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震は、陸域の逆断層型の地震で、マグニチュードが6.8であり、川口町で震度7を記録する等、その周辺地域はきわめて強い震動に襲われた。この強震と丘陵地の崩壊等によって、死者46名、負傷者4,801名、全壊2,827棟、半壊12,746棟に達する大きな災害となった（防災白書）。

衆目を集めた旧山古志村の崩壊だけでなく、たとえば小千谷市中心部の段丘崖や谷壁斜面、小千谷市西部～西南部のわずかな比高の段丘崖等、震源近くの傾斜地では、ごく小規模な地形改変地の盛土部で沈下または小規模な崩壊が発生して、家屋に被害が及んだものが多い（図22a）。以下では、筆者らが調査した3つの住宅団地についてまとめる。

長岡市高町団地：長岡市街地東南方の断層に挟まれた狭い段丘に、中央部を切って周辺部に盛土して造成された団地で、宮城県沖地震で被災した当時の泉市黒松団地と同様の地形改変様式である（図23）。盛土厚は最大でも10m程度、団地縁辺部の盛土部で、沈下や崩壊が発生、建物にも大きな被害が及んだ（図22c, 図23）。団地中央部の切土部では、建物被害はほとんど認められず、道路アスファルトの小亀裂すらない（図22b）。ただし一部では、盛土だけでなく、地山まで亀裂等が達した可能性がある。

長岡市長岡ニュータウン：長岡市街地西方の丘陵（段丘）を大規模に地形改変して開発された大規模団地である（図24）。全体として被害は少ないが、青葉台の切土・盛土境界部では道路のアスファルト舗装面に小規模な亀裂が発生し、なかには約20cmの段差を伴う亀裂が宅地内に発生して建物も被災した事例がある（図22d, e）。陽光台のかつての大きな谷の大規模な盛土部では、液状化が広範に発生し、複数の住家が傾斜し、周囲には噴砂も認められた（図22f）。

長岡市長峰団地：長岡市街地西南方の段丘および断層の撓曲崖につくられた団地である。被害はほとんど認められず、わずかにブロック積み擁壁の一部に亀裂がある（図22g）。

以上のように、丘陵地等に開発された住宅団地では、一部の団地に、盛土部または切土・盛土境界部に被害が集中した。ただし団地によって被害程度の差が大きく、被害程度は、高町

12 佐藤他（1964）は、当被災地域のすぐ北西に被害をもたらした1962年宮城県北部地震の際に山を削って盛土した宅地に亀裂や崩壊が生じたことを報告し、大都市周辺部の宅地造成の危険性を指摘している。約40年後すぐそばで同様の被害が繰り返され、またそのころから盛んになっていた都市周辺の宅造地では、懸念のおおりになったことになる。また、造成農地の地震被害については、1968年十勝沖地震でも発生したことが西村他（1968）で報告されているが、これまでほとんど注目されてこなかった。

13 村山（2005）に基づいてまとめたものである。この文献については、引用を示さない。なお、現地調査は、平野信一（東北大学理学研究科）、吉田明弘（同院生）との共同による。

団地、長岡ニュータウン、長峰団地の順で劇的に小さくなる。

1. 3 課題の特定

上記以外を含めて、丘陵地等の人工的地形改変地の地震被害に関して、これまでに指摘されてきたことの要点をまとめると以下ようになる。

- ①建物等の被害は、切土部で小さく／少なく、反対に盛土部および切土・盛土境界部で大きい／多い。これはほとんど全ての事例に共通している。ただし、盛土部と境界部のうちどちらがよりひどいかについては、事例によって異なる。
- ②被害の様相は、小規模な改変地と大規模な改変地で異なり、前者では法面や擁壁の亀裂や崩壊、後者では境界部での亀裂や不同沈下等が特徴的である。
- ③建物等の被害は、このような亀裂や不同沈下、崩壊等の地盤破壊に伴う場合が多い。
- ④したがって、地下埋設物等の被害も建物と同様の分布を示す。
- ⑤地盤破壊だけでなく、地震動も盛土部の方が大きいためにこれが上記の被害分布の一因になったことを示唆する事例もある。
- ⑥同じ地震でかつそれほど離れていない改変地間で、被害程度に大きな差が認められる。
- ⑦必ずしも明瞭ではないが、古い改変地ほど被害が大きいという傾向が認められる¹⁴。

以上より、地震に対する土地条件把握のために、地形改変の検討が不可欠であることは明らかである。ところが、地形改変を具体的に捉えるにあたっては、多くは新旧等高線の比較・判読によっており、新旧等高線の明瞭な変化がないと地形改変自体を捉えられず、切土・盛土境界線を地図上に描く以上の表現も難しい。また、被害との関連の検討にしても、定量的分析にまで持ち込むことは困難であった。

定量的検討がなされたわずかな事例をみると、田村（1979）は、1978年宮城県沖地震の南光台と緑ヶ丘、1968年十勝沖地震の清田団地について、切土・盛土境界線からの距離別に家屋被害率を求めた。境界線から離れるに従い、切土部では被害率は急落するが、盛土側では、被害率が落ちる場合とあまり落ちない場合があることを見出した。浅田（1982, 1994）は、1978年宮城県沖地震の南光台、鶴ヶ谷、緑ヶ丘等について、盛土の厚さと家屋被害率について検討し、大規模な地形改変の南光台と鶴ヶ谷では盛土が薄いほど被害率が高く、小規模な地形改変の緑ヶ丘では厚いほど被害率が高いことを指摘した。さらに浅田（1982, 1994）は、盛

14 このことに関して、開発（造成）年代が盛土の堅牢度の違いに影響し、古い盛土ほど弱いという指摘がある。浅田（1982, 1994）は盛土のスレーキングの可能性を指摘し、釜井・守随（2002）や釜井他（2004）は1965年～75年に法令や規則が整備されたことを挙げている。ただし、盛土等人工地盤関係法令について筆者が整理したところでは、宅地の盛土地盤そのものに関する統一的な技術基準は従来存在しなかった。これが「総合的な宅地防災対策」のきっかけの1つにもなった。

土部の平均 N 値で顕著な被害発生の評価が可能とし、盛土地盤の N 値が経年変化により 4 以下の場合には鋼管抑止工を施工すること等を提案している。

同じく宮城県沖地震について検討した国土地理院の研究チームは、緑ヶ丘と黒松周辺を対象として、宅地造成前後の空中写真から新旧地形図 (1/2,500) を作成し、これらから盛土厚、旧地形の傾斜 (盛土下)、盛土型等を求めて、これと家屋被害との関係を検討した。その結果、盛土が厚いほど被害が多い傾向が認められるが、厚さと被害は比例的ではないこと、片側斜面型と谷埋型を比べると前者の方で被害が多いこと、旧地形の傾斜が急なところの盛土部に被害が多いこと、旧地形の比集水面積が大きい部分や地下水位が高い部分に被害が多いこと等を明らかにした (小林他, 1980)。

筆者らの研究グループは、1995 年兵庫県南部地震の神戸市垂水区の住宅団地について、切土部・盛土部・境界部ごとに家屋被害率を算定した。被害率は、切土部で低く、盛土部または境界部が高いという共通した傾向があること、団地ごとに被害率が大きく異なることを、数量的に確認した (村山他, 1995 ; 福井, 1996)。

筆者らはまた、上述のとおり、2003 年 7 月に発生した宮城県北部の地震災害について、日本建築学会被害調査 WG による建物 1 棟ごとの被害調査結果をもとに、新興住宅地での被害と地形改変 (盛土) 分布を地図上に示すとともに、丘陵地緩斜面や谷底低地に展開する古い集落における建物被害程度が、建築年代と地盤変状の有無によって明瞭に異なることを定量的に示した (平野他, 2004)。

一方、地理情報システム (GIS) は地形改変の把握や家屋等の被害と土地条件との関連についての分析に有効なツールであるが、これを用いて実際の地震による建物等被害と地形改変地の土地条件把握を試みた研究事例も多いとはいえない。たとえば天国他 (1994) は、GIS を用いて 1993 釧路沖地震の震度と被害の分布を地盤情報と関連させて分析しているが、分析単位が 1/4 分割メッシュ (約 250m 四方) であり、地盤の空間的スケールと整合せず、詳細な検討は困難である。また神戸市・建設工学研究所 (1999) は、阪神・淡路大震災による種々の被害と地形・地質に関する様々な指標を GIS 上でデータベース化した JIBANKUN をもとに、上下水道の被害が谷埋め盛土域、旧溜め池部分に集中する傾向を地図上で提示した。ただしそれ以上の定量的検討については示されていない。

すなわち、GIS を活用して、地形および地形改変に関する土地条件指標群と建物被害との関係について統計学的に検討して、地形改変地の地震に対する土地条件評価を可能にする方法の確立と、それに基づく分析が求められ、筆者らは、東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻杉村義広研究室 (当時) と共同で、釧路と神戸の被災地区を事例として検討した (菅野他, 1995 ; 菅野, 1996 ; 小野里, 1997 ; 村山, 1997 ; Murayama, 1998 ; 小野里他, 1998 ; 鹿

戸他，2000，以下では共同研究と表記。)。このような研究は，この共同研究が最初であると
考えられる。そこでは以下について検討し，上に挙げた文献や学会発表のとおり成果を得た¹⁵。

- ①GIS を用いて，人工的地形改変を把握する方法を検討・確立する。
- ②そこで得られたデータをもとにして，様々な土地条件指標を工夫する。
- ③これらと被害との対応関係を多変量解析等によって同時にかつ定量的に検討する。
- ④事例地域として，釧路（1993 年釧路沖地震）と神戸（1995 年兵庫県南部地震）のそれぞれ
1 地区を取り上げた。これらの事例地区は，地形改変前後の大縮尺地形図が入手できたため
に詳細な分析対象として選ばれた。

さらに，共同研究の検討結果をふまえて，村山（2006b）では，以下の具体的課題について
検討した。

- ①これまで大縮尺地形図がないために分析できなかったところでの分析を可能にするため，地
形改変前の空中写真から DEM を生成する一連のプロセスを検討する。
- ②これにより可能となる複数事例の比較検討を行う。
- ③GIS を用いた空間解析から多変量解析による評価までの全段階における分析手法をさらに
改善する。
- ④地形および地形改変に関する土地条件指標群と建物被害との関係について統計学的に検討し
て，地形改変地の地震に対する土地条件評価をめざす。
- ⑤主たる研究対象としては，釧路市，神戸市垂水区，福岡市東区を取り上げる。それぞれ，
1993 年釧路沖地震，1995 年兵庫県南部地震，2005 年福岡県西方沖の地震により，地形改
変地の建物（住家）が被災した事例である。

以上をふまえて，本研究では以下について検討する。

- ①これまでの研究でほぼ確立した GIS を用いた土地条件指標作成および建物被害データとの
重ね合わせまでの作業と予測地図作製，すなわち統計学的解析段階を除く作業を，（半）自
動化するためのシステムを開発する。
- ②あわせて，これまで検討を重ねてきた GIS を用いた空間解析から多変量解析による評価ま

¹⁵ このような研究は，この共同研究が最初であると考えられる。

での全段階における分析手法をさらに改善する。

- ③以上を用いて、建物被害実績事例を分析して建物被害予測（判別，回帰）モデルをつくり，これをもとに，他の地形改変地の地震による建物被害予測を試みる。
- ④検討対象は，建物被害実績のある事例として釧路と神戸，それらから得られた建物被害予測モデル適用事例として，柏崎と東京とする¹⁶。

なお，本研究と広く共通する問題意識を有する研究として，釜井・守隨（2002），釜井他（2004）がある。彼らは，GIS を利用して詳細な地形改変データを扱い，盛土部全体の移動（滑動）の有無を判別することを目的としている。一方，本研究は，盛土部全体の移動（滑動）の有無に関わらず改変地に存在する建物（住宅）被災に注目し，よりミクロな視点での解析という点で違いがある。筆者のこれまでの調査経験からまた後述のとおり，盛土部全体の明らかなすべりや崩落による住宅等の被災だけでなく，宅地地盤の不同沈下に伴う被災等が数多く存在する。

2. 分析方法と分析システム

2. 1 全体の概要

図 25 は，GIS を分析ツールとして，地震による建物被災を分析する際の枠組みを示すものである（小野里，1997；Murayama，1998）。地形および地質データをもとに，GIS の空間解析機能を用いて土地条件指標を導出する。その土地条件指標に，建物自体の条件，および建物被害の要素を結合してデータセットを構築する。入力データのももとの形態は地図，表（数値，カテゴリー）等様々であるが，GIS 内で位置に基づいて結合され，一体のデータセットとして構築される。GIS 内に構築されたデータセットは，その地図化機能により多種多様な地図化表現が容易にできるため，現象の理解や分析手法の選択を支援することになる。そして，データセットをもとに，GIS 外の統計パッケージ等を用いて，土地条件や建物条件と被害との関連といった被災要因に関する分析を行う。また分析結果に基づいて，たとえばハザードマップ（被害予測・危険度地図）として，地図の形で提示することも可能となる。

以下の分析では，ここで示した枠組みのうち，地質と建築に関わる条件を用いることなく，地形とその改変に関する土地条件指標群と建物被害との関係のみについて，統計学的（経験

16 柏崎では 2007 年新潟県中越沖地震による被災実績があるが，2008 年 8 月までに建物被害データ（同市の罹災証明資料，利用申請中）を用いることができなかったため，予測式適用事例とし，後述のとおり地盤変状の分布との対応を検討することとした。

的)に分析することになる。

以下ではまず、土地条件と被害データの入力から、土地条件指標の導出、データセット構築、統計解析まで、そのプロセスに従って試みていくことにする¹⁷。

2. 2 分析プロセス

2. 2. 1 土地条件指標の生成

(1) データ

地形改変地を対象とする本研究では、地形と地形改変に関わる指標を土地条件指標として取り上げ、その他は補足的に用いることとする。

地形とその改変に関する土地条件指標生成のため、本研究では、地形改変前後の等高線データを用いる。地形改変を詳細に捉えるためには、できるだけ大縮尺の地形図が望ましい。利用可能なものとして、国土地理院が1960年から整備している、1/2,500（等高線間隔2m、都市計画区域等の重要地域）と1/5,000（等高線間隔5m、平野部）の国土基本図がある。ただしこれらの基本図の整備は現在なお全国に及んでいない。また、地図の修正作業も行われていない。現在すぐに入手可能なものは1960-70年代作成のものが中心である。一方、自治体（たいていは市町村レベル）によっては、都市計画等の基図として利用するため、かつては1/3,000縮尺の地形図（等高線間隔2mまたは5m）等を作成したことがあり、後には、多くの自治体が、1/2,500国土基本図（等高線間隔2m）としてこれを整備している。現在都市部の多くでは1/2,500縮尺の地形図が入手可能であると考えられる。さらに近年では、これらの大縮尺図がデジタルマッピングデータ（DMデータ）として整備されることも多くなった。地形改変前後の状態を表す上記の地図を利用できれば、地形改変の状況を詳細に捉えることが可能となる。

ただし、国土基本図も含めて大縮尺の地形図は全国を対象につくられたものではなく、またその目的からも明らかなように、作成時点での市街地や開発予定地を対象としていたため、後の住宅団地等の範囲を捉えていない場合も多い。また、たとえ作成されたとしても、国土地理院発行の国土基本図以外は系統的に保管・管理されておらず、とくに自治体作成の旧版の大縮尺図は保管すらされていない場合も多い。そのため、地形改変前の状況を示した大縮尺図で現在利用可能なものは全国的にも少ないと考えられる。

大縮尺地形図が得にくい地形改変前の地形を把握するための別の手だてとして、空中写真を用いる方法がある。航空機による空中写真撮影は、既に大正期に日本にも導入され、戦中期

17 その大枠は旧杉村研究室との共同研究、およびその後の検討をふまえている。

までには地形図作成に用いられていたが（測量・地図百年史編集委員会，1970），現在も利用可能な空中写真が本格的に撮影されたのは戦後である。1946年から米軍が撮影した約1/40,000 空中写真は日本全域を，約1/10,000 空中写真は鉄道沿線や主要平野部をカバーしている。1950年代からは，国，自治体，民間による各種の空中写真が撮影され，これらも利用可能となった（大竹，2002）。

写真測量によって2m 間隔の等高線（1/2,500 縮尺地図の主曲線）を取得するには，空中写真は1/10,000 程度の撮影縮尺が必要とされる（秋山，2001）。地形改変を詳細に捉えることを目的とする本研究において，この数値は1つの目安と考えられる。つまり，対象地区において地形改変前の撮影縮尺1/10,000 程度の空中写真が入手できれば，これから図化技術によって等高線を取得可能であり，または，デジタル写真測量技術によってデジタル標高モデルDEM が取得可能となる。

このうち，デジタル写真測量技術によって高精度のDEM を取得するには，撮影縮尺の条件だけでなく，撮影に用いられたカメラ・レンズ等の情報や，できるだけ数多くのグランドコントロールポイント（GCP，基準点）の設定等が望まれる。しかし古い空中写真に関しては，撮影状態の良し悪しに加えて，これら全てのパラメータの入手は難しく，なにより地形改変がなされているため確実なGCP を数多く確保することが難しい。そのため，数m グリッドDEM にみあった高精度情報取得は難しく，むしろ専門業者に依頼して旧来の図化技術を用いて2m 間隔の等高線を描画して，これをGIS に取り込んでDEM を生成することが現実的方法であることが判明した¹⁸。

一方，国土地理院の研究チームは，レンズパラメータ等不明の米軍撮影空中写真を用いてブレイクラインデータを取得し，これから高精度DEM を作成することに成功し，地形改変の把握と精度検証を行っている（小荒井・長谷川，2008）。後述のとおり，旧版大縮尺地形図よりも正確なデータが取得でき，さらにパラメータが明らかな空中写真から得たDEM は新版大縮尺地形図の等高線から導出したDEM よりも，詳細かつ正確であるとしている。

以上より，地形改変の後については，多くの場合国土基本図やDM データによって等高線が入手でき，改変前については，これらが利用できない場合でも，撮影縮尺1/10,000 程度の空中写真から等高線またはブレイクラインデータを取得しこれが利用できる見通しを確認した。以下の事例においては，釧路では都市計画図（1/3,000），神戸，東京，柏崎では空中写真（撮影縮尺1/10,000 程度，神戸と東京は等高線，柏崎はブレイクラインデータ）を用いて，地形改変前のDEM を得る。なお，柏崎の分析においては，新旧空中写真から得たブレイクライン

18 デジタル写真測量の専門技術者（北海道地図（株））とともに，地形改変前の空中写真をもとに具体的に検討して得た結論である。

データを国土地理院から提供を受け（国土交通省国土地理院地理調査部防災地理課，2008），これを用いた。図 26 は，本研究の DEM 生成までのプロセスの概要を示したものである。

(2) 等高線入力

紙の地形図の等高線を GIS に取り込むには，大判デジタイザを用いて等高線に沿って点をプロットしてラインを生成して，これに標高値を与える方法と，地形図を大判スキャナで取り込んで等高線をベクタライズおよび手作業による修正を施して，これに標高値を与える方法がある。ここでは，後者による方法を採用した。ただし，印刷された等高線はふつう地物によって途切れているため，入力作業には，読図によってこれを繋ぐという繁雑な作業を伴う。

DM データについては，等高線が連続した線として入力されている場合と，印刷物での表現と同様に地物で等高線が切れたままの場合がある。後者の場合は，紙の地図と同様に，読図によって等高線を繋ぐ作業を伴うことになる。神戸市の DM データは前者の形態であるため，データ変換作業のみで GIS に入力できたが，釧路市と東京都の場合は後者の作業が必要であった。

さらに，空中写真を用いる場合は，上述のとおり，解析図化機による等高線描画とそのベクタデータ作成を，専門技術を有する業者に委託する必要がある。今回の分析においては，神戸と東京の地形改変前の等高線はこのようにして獲得し入力したもので，柏崎については，国土地理院から提供されたブレイクラインデータである。

(3) Triangular Irregular Network (TIN) による標高データの補間

等高線から DEM を生成するアルゴリズムは複数あって改良の試みが重ねられているが（たとえば，野上，1991；古舘他，2000；大野・田村，2002），ここではもっとも一般的な方法の 1 つである TIN による線形補間とした。ブレイクラインデータも同じ方法による。この方法は，等高線またはブレイクラインデータを構成する点の集合から，高さ成分を有する三角形を多数形成して，全体を三角形で埋め尽くすように分割し，すなわち地表面をこれらの三角形平面群で近似して，あらゆる地点の地表面標高を線形補間により算出するというものである。

(4) グリッドデータへの変換

ここでは，5m×5m の正方グリッド（メッシュ）を設定し，グリッドの中心点の標高値を(3)の結果をもとにして，各グリッドに与える。このデータは後の分析のベースとなるものであるため，グリッドは可能な限り小さいことが望ましいが，5m という値は，分析対象である住宅や宅地の大きさ等から考えても適当であると考えられる。ただし，後述の鈴木他（2002）による精度の検討から類推すると，5m は詳細すぎる懸念がある。一方，小野里（1997）は，2m と 10m のグリッドについて比較検討して，10m では傾斜等を捉える際に粗すぎると結論づけ，共同研究では 2m グリッドを用いていた。しかしこれは詳細すぎると判断

されるので、本研究では5mグリッドを採用することとした。なお、分析作業結果を含む誤差については後に再検討する。

(5)土地条件指標の生成 (図 27)

○ 切盛境界 (切土部・盛土部・境界部)

グリッドごとの新旧標高差をとり、「新標高 > 旧標高」の場合、標高の上昇を盛土によるものとみなし、逆の場合、標高の低下を切土によるものとみなす。新旧標高差0mの場合も切土側とし、これと0m未満の範囲との境界線を切土・盛土境界推定線とする。

切盛境界推定線から両側に10m以内のバッファ、すなわち20m幅の帯状の範囲を、境界部とする。それより切土側(境界からの距離が10m超)を切土部、盛土側(同様)を盛土部とする。本指標は以上の3つを含むカテゴリカルデータである。境界部として幅を設けたのは、境界推定線の位置の誤差を考慮したことによる。それを10m+10mとしたのは、後述のように、誤差がおおむねこの範囲に収まると判断したからである。この幅を実際の宅地の大きさと比べると、おおむね1~2筆分の範囲に収まる程度である。

上述のように、盛土部では、盛土の沈下や移動といった地盤破壊が起こり得る。加えて、盛土部は一般に切土部に比べて軟弱であるから、地震動の局所的な増幅の影響もあると考えられる。また、境界部では被害が集中したという事例がこれまでも多く認められており、盛土側の沈下や移動による亀裂や不同沈下¹⁹、切土部と盛土部とで異なる特性の地震動による影響等が指摘されている。これらに比べて、切土部では被害が圧倒的に少ないことが知られている。

切土部と盛土部の地震動の違いに関しては、以下のような既存の報告がある。村山(1980)は、宮城県沖地震の際に仙台周辺の地形改変地において、団地間の差の方が大きいものの、同じ団地内においては切土部に比べて盛土部の方で地震動が強い場合があることを、家具の転倒状況から推測して示した(図6)。Tamura and Takeuchi(1980)は、多摩ニュータウンのボーリングデータから、基盤に比べて盛土内のS波、P波速度(V_s , V_p)が小さいことを示した。すなわち盛土部では切土部に比べて、増幅や周期の伸びが想定される。浅田(1994)は、南光台における常時微動観測から、切土部に比べて盛土部の平均振幅が大きく、かつ盛土が厚くなるほど平均振幅が大きくなることを見出した。落合他(2003)は、2003年5月の宮城県沖の地震によるアンケート震度調査に基づいて、仙台市泉区のある造成宅地において、切土部よりも盛土部で震度が平均で0.3、最頻地で0.5大きいことを明らかにした。さらに、藤原(2002b)は、芸予地震において広島市強震記録をもとに丘陵地の切土地盤で最大

¹⁹ 横田・仲津(1996)は、改変地の比較的大きな亀裂を対象にトレンチ調査を行い、亀裂が、盛土部と旧谷地形斜面との接する部分に発生していることを確認した。なおここでは、盛土部の水平変位(滑動)も認められ、地表部の亀裂は切盛境界のやや盛土側に出現した。

加速度が 220～300gal、盛土地盤で 476gal だったことを示した。釜井他（2005）も、長岡市高町団地における新潟県中越地震後の余震観測で、盛土部が切土部より加速度で 1.8 倍、速度で 1.3 倍に増幅したことを見出した。ただしこれには地形（崖の縁）の効果も含まれるとしている。このように地震動に関しても、切土部よりも盛土部が不利であることが想定できる²⁰。そしてこのような地震動の違いは、境界部での地盤破壊の原因の 1 つでもあると考えられ、また境界部にある（切土部と盛土部にまたがる）構造物に被害をもたらす原因の 1 つと考えられる。

○ 境界距離 (m)

後の定量的分析のため、数量データとして、境界距離を設定する。具体的には建物ポイントから境界推定線までの最短距離をとる。上述のとおり、境界に近いほど被害が多い・大きい可能性がある。

○ 盛土厚（深さ） (m)

新旧のグリッド標高値の差（新標高値－旧標高値）そのものであり、新旧標高差が負の場合、0 を与えることとする。盛土が厚いほど、沈下や亀裂等が生じやすいと考えられる。また先述のとおり、盛土部は切土部（地山）に比べて一般に軟弱であるため、盛土厚が大きいほど地震動の増幅も大きいと考えられる。

○ 現傾斜（改変後の傾斜） (°)

この指標は、改変後の地表の傾斜を指す。グリッドデータに基づく GIS 組込みの標準的計算方法は、当該グリッドとそれを囲む 8 個のグリッドとの標高差と距離をもとに、当該グリッドから 8 方角に向けて傾斜を求めて、その最大値を与えるというものである（Booth, 2000）。8 方角以外に最大傾斜が存在する場合は、この指標の値は真の傾斜より少し小さなものになる。最大傾斜を厳密には捉えられないが、ここでは、GIS 標準機能によることとする。

改変後の傾斜は、上のとおり、15m×15m の範囲内で求めることになるが、これは平均的な 1 つ（またはせいぜい隣）の宅地にほぼ収まる大きさである。そのため、改変後の宅地においては、傾斜 0° となるものが多くなることが予想される。ところが、グリッドごとの標高を与える際には等高線に基づく TIN による線形補間を行っているため、この等高線間に設定された三角形平面の傾斜（1 つの宅地の大きさを超える範囲になる場合がほとんど）における傾斜を求めていることになる。このことは、土地条件指標としてはむしろ好ましい。傾斜が大きいほど、宅地の擁壁が高く不安定になり、崩壊やすべり出し等の危険性が高まると考えられる。

釜井他（1996）は、1995 兵庫県南部地震による高速な流れを伴った地すべりは、2 箇所と

²⁰ この他に筆者は、1993 年と 1994 年にたてつけに大地震に襲われた釧路において、盛土部に住むある住民が「近所の切土の家に比べて、いつも強く揺れる」という聞き取り調査結果を得た。

も、20度以上の盛土斜面で発生したことを指摘している。

○ 盛土下傾斜（盛土に埋積された改変前の地形の傾斜）（°）

盛土で埋積された改変前の地表の傾斜である。傾斜の求め方は改変後のそれと同じであるが、ここでは盛土厚 0 を超えるエリアについて改変前の地表面の傾斜を与え、それ以外のエリアについては 0 を与えることとする。

この傾斜が大きいほど、盛土の不同沈下やすべり等が生じやすいと考えられる。前述のとおり、宮城県沖地震について、旧地形傾斜と被害が関係することが既に指摘されている（小林他，1980）。

釜井他（1996）は、宅造地の人工谷埋め盛土の地すべりの発生箇所について、盛土下の谷の傾斜の下限が、約 3~5° であるとしている。ただしこの値は、谷の盛土全体が滑動した事例について求めたものであり、本指標とは空間的スケールが異なる。本指標では、当該グリッドの位置により、盛土下の谷の傾斜にかぎることなく、盛土下の谷壁斜面の傾斜等を求めることになる。

○ 凸指標（m）

凸部や崖の直上部を抽出するために設定する指標である。菅野（1996）が考案したものであり、釧路市緑ヶ岡の段丘崖直上部（肩の部分）を抽出できる等、その有効性が確かめられた指標である（小野里他，1998 等）。その方法は、改変後の地形について、42m×42m の正方形の範囲（21×21 個の 2m グリッド）の平均標高からその正方形の中心グリッドの標高を引いた値をそのグリッドに与えるもので、「崖値」または「凸指標」と称した。この方法では、負の値が凸部や崖の直上部を示すというわかりにくさがあった。そこでここでは、グリッド中心から半径 25m の円内のグリッドの平均標高を求め、当該グリッドの標高からそれを引いて求めた値を凸指標とし、グリッドに与えた。よってこの指標の単位は m となる。

この近傍演算は、空間フィルタリングの一種であるラプラシアンの一変形であるといえる。ただし、通常のフィルタリングマスク（演算子）は正方形または十字形であるが、ここでは円形のマスクを用いている。また、通常のラプラシアンとは符号（差の求め方）が逆であるため、結果としてハイパスフィルタと類似したものとなっている（日本リモートセンシング協会，1992）。

ここで、その値が大きい（正の）場合は、凸部ないし崖上等を示し、逆に負の場合は、凹部ないし崖下等を抽出することになる。崖上や凸部であることは、地形的に不安定であり、崩壊等の可能性が考えられる。また、崖上の肩の部分では、その形状により波動エネルギーの集中を起こしやすく、振動が増幅しやすいことが知られている（たとえば日本建築学会，1993）。

2. 2. 2 土地条件指標の誤差

共同研究では、釧路の新旧紙地図（1/3,000 と 1/2,500 都市計画図）の等高線を GIS に取り込んでこれを利用した。その際にいくつかの視点から誤差について検討した（村山，1997）。まず，GIS によって抽出された盛土部の分布と，筆者がこれとは別に手作業で求めた切盛境界推定線図とを比べた（図 28）。両者はよく一致し，一連の手続きが妥当であったことを確認した。一部に手作業では捉えられなかった小規模な盛土部も抽出された。さらに盛土の分布と厚さの精度について，釧路市による複数のボーリングデータとの照合を行った。ボーリングデータに「盛土」と記載されているもの以外に，たとえば火山灰等も盛土であると判断されるものが多くあり，これらと新旧 DEM から推定した盛土厚とは比較的良好に整合しており，おおむね 1~2m 程度の誤差に収まる。さらに複数の聞き取り調査によれば，切盛境界推定線がほぼ完全に一致したもの，数 m ずれたもの等あったが，ボーリングデータの検討とあわせて，おおむね正確であると判断した。切盛境界推定線の水平のズレは数 m，最大でも 10m 程度以内に収まると判断される。この検討結果は，改変後のデータとして DM データを用いた本解析にもあてはまり，たとえばボーリングデータとによる突き合わせた結果は上と同じである。ただしこれらは後述の鈴木他（2002）のように誤差の評価を定量的に行ったものではない。

なお，誤差の原因としては，地形図の等高線の誤差，作業過程における誤差等が考えられる。このうち，地形図の精度に関しては，「等高線の精度は主曲線間隔の 1/2 以内」（基本図測量作業規程，建設省国土地理院，1995 年）とされている。地形改変後の地形図は，主曲線間隔が 2m なので，標高の誤差はおおむね 1m 以内であると考えられる。ただし，釧路の 1956 年都市計画図は，全国統一の規格で高い精度の大縮尺図の提供を目的とした国土基本図事業の開始（1960 年）よりも前であることから，その精度は上よりも劣る可能性がある²¹。

一方，神戸，東京，柏崎の改変前の等高線については，図化作業における誤差が含まれることになる。鈴木他（2002）は，米軍撮影 1/10,000 空中写真に基づく航測図化作業による精度の検討を行い，基図とした都市計画図に対して，水平方向で最大 3~5m，標高について最大 2m 程度という数値を提示している。林・小口（2002）は，写真測量で取得された地形データの誤差について多くの既存研究を検討し，GCP 設定条件を誤差要因の 1 つとして挙げている。鈴木他（2002）が提示した数値は，対象地域内に GCP を多数設定するように工夫して得られたものである。しかし地形改変前の地形を把握するには GCP の設定が困難であるため，本研究で採用した解析図化作業結果は，これよりも精度が悪いと考えられる。なお，柏崎につ

21 小荒井・長谷川（2008）は，新旧大縮尺地形図（等高線から DEM 作成）による地形改変把握と新旧空中写真（ブレイクラインデータから DEM 作成）によるものとの比較を行い，後者の精度が優れていること，とくに旧版大縮尺地形図の精度が低いこと等を明らかにしている。

いては、国土地理院から提供を受けたもので、小荒井・長谷川（2008）によると、その精度は他よりも高いと推測される。

また実際の作業は基本的に 1/2,500 ないし 1/3,000 縮尺図をもとに行われており、5m は、1/2,500 図上で 2mm、1/3,000 図上で約 1.7mm にあたるため、手作業の精度の限界、コピーの際の歪み、図面の伸び縮みを考えれば、5m グリッドに基づく分析は限界に近いと考えられる。

以上から、5m グリッドによる分析は、限界ないしやや詳細にすぎるとも考えられる。たとえば海津（2004）は、新旧 1/2,500 地形図に基づいて地形改変を把握する作業において、10m グリッドが等高線の精度と作業量の点からもっとも適当であると述べている。一方で小野里（1997）は、10m グリッドでは粗すぎるという検討結果を提示している。ここでは、主たる対象とする住宅 1 戸ごと（住宅地 1 筆ごと）の大きさも考慮して 5m グリッドを採用することとし、上で示したようにバッファを設定して境界部を設定する等したうえで、考察を行うこととする。

2. 2. 3 建物被害データと土地条件指標との結合

建物被害データは、後述のとおり、事例地区ごとに異なる方法で収集されたが、以下の点を揃えた。建物構法によって被災程度が異なることが容易に予想されるため、対象地域にもっとも多く存在する戸建て住宅を主対象とし、集合住宅等の明らかに大規模な建物を除外した。ただし、対象には小規模の集合住宅を含み、また多くは木造であるが軽量鉄骨造等を含む。

建物の堅牢度の違いは建物被害の有無または軽重にとって重要であることはいままでもないが、ここではこの点をまったく考慮しないことになる。一般に建物の堅牢度は、建物構法に加えて建築年代によっても大きく異なる（たとえば平野他，2004）。ただこの分析においては、地形改変によってつくられた比較的新しい住宅地を対象とするため、少なくとも同じ住宅団地内における建物の新旧の幅は小さいと考えられる。すなわち、分析対象建物の構法を限定したこととあわせて考えると、分析対象の建物堅牢度のバラツキは比較的小さいと想定できる。

この建物のほぼ中心点を GIS 内の手作業でプロットして、このポイントデータに建物被害程度を与える。そして、そのポイントが位置するグリッドの土地条件指標群データを、そのポイント属性に加える。結果として、建物 1 棟ごとに建物被害程度と土地条件指標群を有するデータセットを作成する。

2. 3 建物被害と土地条件指標群との関連の分析および土地条件評価

建物被害程度と個々の土地条件指標との関連をみるため、クロス集計表を作成して、GIS

による出力地図と合わせて検討する。さらに、この結果をふまえて、建物被害程度と土地条件指標群との関連をみるために、ロジスティック回帰分析にかける。土地条件指標群を独立変数とし、建物被害程度を従属変数として、各分析事例において有意な土地条件指標を探る。実際の分析においては、結果の解釈が複雑にならぬよう、従属変数の建物被害程度は 2 分類のみとした。

クロス集計によって、各土地条件指標と建物被害程度との関連の強さは把握できるが、たとえば盛土厚は境界距離と正の相関を持つことが想定される等、土地条件指標群は実際には相互にある程度の関連を持つと考えられる。ロジスティック回帰分析によって、他の土地条件指標の影響をコントロールしたときの、建物被害程度に対する各土地条件指標の関与のあり方が把握できることになる。

なお、村山（1997）や小野里他（1998）では判別分析または数量化 II 類を採用していたが、本研究で採用したロジスティック回帰分析は、これらに比べて理論的により望ましく、かつ、本研究対象のように従属変数の分布（判別される群ごとの数のバランス）が 7 : 3 以上偏る場合でも適用可能であるとされている手法である。さらに、従属変数の確率の変化を正確に推定できるという利点もある（古谷野，1988）。

そして、ロジスティック回帰分析（ステップワイズ）によって選択された変数（土地条件指標）およびそれらによる回帰式（判別式）を用いて、GIS 内において、各種土地条件指標群を格納するグリッド演算を行い、図化する。これは、ロジスティック回帰分析結果を地図化ことになり、建物被害発生予測確率分布を示すことになる。これをもって、地形改変地の土地条件評価図とする。

2. 4 地形改変地土地条件評価システム

以上のプロセスのうち GIS に関わる部分が自動実行できるよう、ArcGIS9.2 のモデルビルダーで GIS プロシージャを構築した²²。本システムは、以下の 4 つのツール群からなり、順に処理を実行することで、新旧の地形データから土地の標高、傾斜角、切盛厚、凸指標、切盛境界線、予測マップ等のデータを作成するツールである（図 29）。

①土地条件指標ツール

土地条件指標ツールは、等高線やブレイクラインで作成された新旧の地形データから、「新旧標高モデル」、「新旧傾斜角」、「切盛厚」、「半径 25m 平均標高」、「凸指標」、「盛土下傾斜（新傾斜版・0 度版）」、「盛土厚」を全て GRID データとして作成するツールである。

²² このシステム構築に当たっては、(株)パスコ東北事業部の小野芳樹の協力を得た。

このツールの中で「盛土下傾斜（切土部新傾斜版・切土部 0 度版）」は、切土部エリアに新傾斜度（改変後の傾斜）または 0 度の値を格納するもので、新旧地形データの TIN データの差分抽出機能を利用し切盛の境界データである「切土部エリア、盛土部エリアデータ」を作成し、空間解析機能で切土部エリアに新傾斜度または 0 度の値を格納する。「盛土厚」についても同様に切土部エリアを抽出し、切土部エリアに 0 の値を格納する。

以上作成された 6 つの GRID データからポイントデータである住宅被害データに、当該地点の GRID データの属性数値をポイント抽出機能で格納する。

②切盛境界ツール

切盛境界ツールは、①の中で TIN データの差分抽出機能に作成された「切土部エリア、盛土部エリアデータ」から、切土部エリア、盛土部エリア、境界部エリアを生成し、「切盛境界部データ」を作成する機能である。

境界部エリアは、切土部エリア、盛土部エリアの境界ライン（切盛境界推定線）について片側 10m のバッファを発生させ作成する。また住宅被害データと切盛境界までの最短距離を自動計測し、境界距離を属性数値として住宅被害データに格納する。

③テーブル結合ツール

テーブル結合ツールは、標高、傾斜角、境界距離等の属性数値を格納した住宅被害データが個々の Shape ファイルとして作成されていることから、それらを一つのファイルデータにまとめるためのツールである。

④予測マップツール（距離版・演算のみ版）

予測マップツールは、計算式パラメータごとに「距離版」・「演算のみ版」を用意している。「距離版」は境界距離データをパラメータとして利用する場合のものである。「演算のみ版」は境界距離パラメータが不要な場合のツールである²³。

3. 判別モデルの構築 — 釧路と神戸 —

これまでの検討を経て導かれた分析プロセス、すなわちそれらを GIS プロシージャとしてまとめた地形改変地土地条件評価システムを用いて、まず、釧路と神戸の事例について分析する。そして、それぞれの事例について建物被害予測（判別）モデルを求める。

なお、釧路と神戸の分析は、村山（2006b）でも既に行ったところであるが、同じ等高線デ

23 境界距離の演算には長時間を要するため、境界部（境界推定線から 10m バッファ以内）かどうかのダミー変数を設定し、これによる解析～予測（判別）も試みたが、境界距離を用いたものより結果が思わしくないので、最終的にはシステムから除外した。

ータを用いながらも、本システムを用いて今回新たに再分析したものである。

3. 1 釧路

3. 1. 1 1993年釧路沖地震と対象地区の被害の概要

釧路沖地震のマグニチュードは 7.5、震源は釧路沖（釧路のほぼ直下）で深さは約 100km、太平洋プレート内で発生した地震である。釧路の震度は 6 と発表されたが、地震動は市内でも場所によってかなり差が認められた。釧路市内では 5 箇所強震記録が得られたが、それらの最大加速度値は 300gal 程度から 900gal 以上まで場所により大きく異なっており、旧釧路川以東の段丘上では全般に加速度が大きく、一方西部の沖積低地では半分以下の加速度であった（震災予防協会 ESG 研究委員会, 1994 ; 笹谷, 1994）。

ここでの分析対象地域は、釧路市中心市街地の南東側の釧路段丘に展開する地形改変地である。当地域の段丘は、開析が進んでいるため、宅地開発等の際には、地形改変を伴う。後にみるように、対象地域は主として 1960 年頃以降、急激に都市化された。段丘頂部には、風化が著しく N 値 10 以下となる屈斜路軽石流堆積物（岡崎, 1966）を載せている。そして基本的には、これを含む段丘の構成層が切りとられ、盛土材として使われていると考えられる。

被害は、分析対象の段丘地域なかでも緑ヶ岡とその周辺に集中した。これは、地震動の分布と調和的である。しかし前述のように、家屋被害は、強振動によって直接もたらされたというよりは、地盤破壊が直接的原因となったものが多い。藤原他（1994）は、全壊住宅のうち約 75%は地盤変状の影響を受けているとし、地盤変状→基礎の破断や沈下→上部に波及して被害拡大という木造建物被害の特徴を指摘している。藤原らはまた屋根の軽さ、基礎の深さ、壁量の多さ等によって、一般に釧路の木造家屋がきわめて堅牢であったことも指摘している。

3. 1. 2 データ（釧路）

(1) 地形改変前後の等高線

地形改変前の地形図として、等高線間隔 2m の 1/3,000 都市計画図を利用した（図 30）²⁴。

この範囲外および欠損部分については、等高線間隔 5m の 1/10,000 都市計画図²⁵を用いて等高線を入力した。図 30（1956 年）の右下部分の等高線が粗になっている部分がそれにあた

24 1/3,000 図に記載の諸元は下記のとおりである。

1956 年測図、パシフィック航空測量株式会社調整、1956 年 6 月撮影空中写真、同年 10 月現地調査、ガウス等角投影法、等高線間隔 2m、ケルシュプロッターによる機械図化、国土調査法第 13 座標系。

25 1/10,000 都市計画図の諸元は下記のとおりである。

1957 年測図、パシフィック航空測量株式会社調整、1/3,000 地形図を編集。それ以外の地域は下記のとおり、1947 年 10 月米軍撮影空中写真、1957 年 10 月現地調査、ガウス等角投影法、等高線間隔 5m、ケルシュプロッターによる機械図化、国土調査法第 13 座標系。

る。ただし、複数回にわたる分析試行の結果をふまえて、分析の範囲を上記の 1/3,000 都市計画図の範囲内に限定した。さらに、1956 年時点で既に開発（改変）が行われていたところ、および等高線の変化を伴う目立った地形改変が認められない部分や広い谷底低地部を、分析の範囲から除外した。

地形改変後については、2000 年作成の釧路市 DM データ（北海道地図株式会社調整、等高線間隔 2m）の使用許可を得たので、これを利用し、GIS 作業の基図としても利用した。

これらから、前述の方法で等高線データを GIS に入力し、これから 5m グリッドの DEM を生成した。緑ヶ岡のごく一部については、1993 年釧路沖地震による崩壊とその後の土木工事によって明らかな地形変化が認められたので、1987 年測量の都市計画図をもとに、筆者が等高線を修正した。

(2) 建物（住家）被害

釧路市がまとめた資料「災害状況の内訳（住家被害）最終」を基本的に使用し、これを同市住宅建築部がまとめた「被災住宅危険度調査集計表（H5.8.31 現在）」で補足した。被害程度は「全壊」、「半壊」、「一部損壊」、および「軽微な被害記載のみ（全壊等の記載なし）」である。本分析では、「軽微な被害の記載のみ」を「無被害」（下記）に含めて、4 分類とした。このデータは、被災した市民が釧路市に届け出て、市の担当者が被害程度を判定して作成されたものである。ここでは届け出のなかったものを「無被害」として扱った。被害程度は専門家の判定によるため信頼できるものと考えられるが、「無被害」は上記のとおりであり、全体として実際の被害はこのデータよりも多いはずである。なお、地震直後の現地調査で認められた明らかに被害の大きい家屋で、釧路市資料に掲載がないために「無被害」となったものもわずかながらあった。また、上記のような収集方法であるため、被害数の数え方としては「世帯」を用いるべきかもしれないが、住家の実態からしてまた他の事例と同じく「棟」を用いることとする。

上記資料の住所から、地震直後に入手した住宅地図を利用して、1987 年測量の都市計画図（1/2,500 を縮小コピーしたもの）に被害程度とともにプロットした。これを基に、大規模な集合住宅等を除いて、GIS 作業の基図として利用した釧路市 DM データ（2000 年）の建物（住家）のほぼ中央に手作業でポイントを打って GIS に入力し、「無被害」を含む被害程度属性を与えた（図 31）。ただしポイント位置は、地震時の建物位置になるようにしたため、釧路市 DM データの建物位置とずれたものが一部にある。この間の建て替え等によると考えられる。

3. 1. 3 結果（釧路）

分析の範囲を、上記の 1/3,000 都市計画図の利用可能な範囲に限定し、さらに広い開析谷の

谷底を除く等したため、当地区の分析対象建物数は、2,654 棟である（図 31）。当地区は、材木町、貝塚、緑ヶ岡の大部分を含む。当地区は、旧来の釧路中心市街地からみて旧釧路川を挟んだ東方の段丘部にあり、もっとも被害の集中した地区である。当地区内の、住家（戸建て住宅および小規模な集合住宅）に関する被害をみると、全壊と半壊を合わせた被災割合は約 2%、これに一部損壊を合わせて約 4.8%である。盛土斜面の崩壊 2 箇所（緑ヶ岡 5 丁目と材木町）の他、宅地地盤の不同沈下による家屋の傾斜や基礎の被害等が発生した。若松他（1994）は、緑ヶ岡の崩壊地等で液状化も発生したと報告している。

当地区では、1960 年前後から 1970 年代前半にかけて急速に地形改変を伴う宅地開発が進んだ。地区の北部では 1964-69 年に区画整理事業が実施されたが（田代・石丸、1995）、釧路市の資料によると、その区域内を含めて規模の小さい多数の開発行為によって宅地造成が行われた。そのため、もともとの起伏が小さいこともあって、地形改変の規模は小さく、盛土厚は分析対象地域内で最大 15m に満たない。

(1) クロス集計

○ 切盛境界（切土部・盛土部・境界部）

切土部で被害が小さく少ないのに対して、盛土部と境界部に多い。全壊と半壊 53 棟のうち、切土部にあるのは半壊 3 棟のみである。すなわち、家屋被害は、切土部、境界部、盛土部の順で多く・大きくなる傾向がみられた。ただし、一部損壊は、盛土部や境界部よりも少ないとはいえ、切土部にもかなり分布していることもわかる（図 32, 図 33, 表 1）。

○ 盛土厚（深さ）

対象地域内は、もともとの起伏量が大きくない。しかしその盛土厚と被害は、きわめて明瞭な量的関係が認められ、盛土が厚くなるほど、被害が多い・大きい。ただし、一部損壊の分布傾向は、全半壊ほど明瞭ではない（図 32, 図 34, 表 2）。

○ 現傾斜（改変後の傾斜）

地形改変後の傾斜と建物被害との関係は、それほど明瞭ではない。むしろ急傾斜部の上部（崖の肩の部分）に全壊等が認められる。ただし、 8° を超えるところでのみ、全壊と半壊の割合が他よりも高い傾向がみえる（図 35, 図 36, 表 3）。

○ 盛土下傾斜（盛土に埋積された改変前の地形の傾斜）

一方、盛土の下に埋積されたもとの地形の傾斜との関係をみると、その傾斜が大きくなるほど全壊と半壊の割合が高くなることが明瞭である。 20° を超えるところでは一部損壊の割合も高くなるが、それ以外はあまり差がない（図 37, 図 38, 表 4）。

○ 凸指標

凸指標 1.0 超は、段丘崖の直上（肩）等を明瞭に抽出していることがわかる。ここでは、他

よりも明らかに全壊の被害が多い。とくに盛土部の場合は崖の崩壊や擁壁のはらみ出しによる大きな被害があり、これらの指標で捉えられている。ただし、凸指標 1.0 超の住宅数の全体に対する割合は小さい（図 39，図 40，表 5）。

(2) ロジスティック回帰分析

クロス集計結果をふまえて、従属変数を「全壊」＋「半壊」／「一部損壊」＋「無被害」の 2 分類とすることとした。独立変数として、先述のとおり切盛境界はカテゴリカルデータなのでその代わりに「境界距離」を採用し、「盛土厚」，「現傾斜」，「盛土下傾斜」，「凸指標」の 4 変数とともに投入した。その結果は、表 6 のとおりである。

ステップワイズ法により 3 変数が有意な独立変数として選ばれ、盛土下の旧地形の傾斜が大きいほど、盛土が厚いほど、凸であるほど（崖上等であるほど）、全壊や半壊になりやすいことが判明した。優比（独立変数の単位あたり変化に伴う従属変数の起こる確率の変化）は、全壊や半壊になる確率が、盛土が 1m 厚くなるごとに 1.279 倍、盛土下傾斜が 1° 大きくなるごとに 1.123 倍、半径 25m 内平均標高より 1m 高くなるごとに 1.867 倍になることを示している。そして、分割値を 0.02（2%）としたとき、このモデルの的中状況は表 7 のとおりであり、全体の正分類率は 78%である。

同回帰式による建物被災予測と実際の建物被害分布をみると、全壊や半壊は、例外を含みつつも、予測確率の高いエリアまたはそのそばに多くあることがわかる（図 41）。

3. 2 神戸市垂水区

3. 2. 1 1995 年兵庫県南部地震と対象地区の被害の概要

1995 年兵庫県南部地震（M 7.3）は、神戸の直下を含む範囲の断層活動によるもので、きわめて大きな被害をもたらした。この地震で、六甲山麓やその背後に広範に展開する郊外住宅地等の地形改変地にも、大きな被害が発生した。ただし、郊外住宅地では、神戸の中心市街地で発生したような軒並みの倒壊や延焼火災はなかった。

ここで対象としたのは、神戸市垂水区のある住宅団地（上記で紹介した A 団地）であり、聞き取り調査によると 1960 年代前半に神戸市によって造成されたものである。地区内には集合住宅地区も広範囲にあるが、これらは対象外とし、戸建て住宅や小規模な集合住宅のみを対象とした。前述のとおり当地区では、仙台や釧路と同様に、宅地地盤の不同沈下等によって建物に被害が及んだものが多く、また複数の住家を載せたまま谷埋め盛土が移動（滑動）したのものもある。

3. 2. 2 データ

(1) 建物被害

建物被害データは、地震発生の約 2 ヶ月後にあたる 1995 年 3 月に実施した現地調査に基づく²⁶。家屋被害判定は、先述のとおり、震災復興都市づくり特別委員会(日本都市計画学会関西支部・日本建築学会近畿支部)による阪神震災復興緊急基礎調査の「震災調査マニュアル」になった。被害程度は、「全壊または大破」、「中程度の損傷」、「軽微な損傷」、「無被害」の 4 段階である。同マニュアルは目視によるもので、道路側から見える部分しか捉えられない。また、既に修理を終えた家屋もあり、実際の被害は、調査で得た被害情報よりも多いと考えられる。

調査対象地区のうち、かつての溜め池の堤といった明らかに古くからの改変地等を除いた調査対象総数は 591 棟である(図 42)。このうち「全壊または大破」が 16 棟、「中程度の損傷」が 84 棟、合わせて 100 棟、約 17%という高率で中程度以上の大きな被害が生じた。

(2) 地形改変前後の等高線

当地域では、地形改変前の大縮尺地形図が入手できないため、前述した方法で空中写真から等高線を描出し、GIS に取り込んで DEM を生成することとした。使用した空中写真は、1947 年米軍撮影のもので、撮影縮尺は約 1/8,000 である。

地形改変後については、2000 年の神戸市 DM データの使用許可を得たので、これから間隔 2m の等高線を抜き出して利用した。同 DM データ内の等高線は道路や地物で途切れることなく、また標高値も与えられているので、基本的にはそのまま利用可能であった(図 43)。

3. 2. 3. 結果

(1) クロス集計

○ 切盛境界(切土部・盛土部・境界部)

まず特徴的なことは、切土部に位置する建物が極端に少ないことである。それは、この住宅団地では、切土部に中層の集合住宅が数多く建てられ、その周囲に戸建てや小規模集合住宅が配置されているからである。

建物被害との関連についてみると、全壊または大破の被害が境界部に多いことが明瞭である(図 44, 図 45, 表 8)。盛土部と切土部を比べると、中程度の損傷まで加えた場合に盛土部の方が切土部よりも多いことがわかる。切土部には中程度以上の被害家屋が 7 棟認められ、そもそも切土部の戸数が少ないために割合として高くなっている。一方、軽微な被害は、明瞭

²⁶ 調査者は、村山良之、増田聡(当時東北大学情報科学研究科)、川口祐輔、福井巧(当時東北大学理学部学生)の 4 人である。

な分布傾向を認めることができない。

○ 盛土厚（深さ）

分析範囲でみたときの盛土厚は最大約 20m である。全壊または大破の被害は、盛土厚の薄い部分に集中し、中程度の被害についても同様の傾向が認められる。上でみたとおり境界部に被害が集中していることが反映しているものと考えられる。また先と同様に、軽微な被害には明瞭な分布の偏りが認められない（図 45，図 46，表 9）。

○ 現傾斜（改変後の傾斜）

この土地条件指標は、全ての被害程度について、その分布との明瞭な関係を認めることはできない（図 47，図 48，表 10）。

○ 盛土下傾斜（盛土に埋積された改変前の地形の傾斜）

盛土下に埋積されたもとの地形の傾斜については、中程度の損傷以上の被害について、明瞭な量的関係が認められ、傾斜が大きくなるほど被害が大きい。軽微な被害については、ここでも明瞭な傾向はみられない（図 49，図 50，表 11）。

○ 凸指標

この指標については、被害との明瞭な関係が認められない（図 51，図 52，表 12）。

(2) ロジスティック回帰分析

クロス集計結果をふまえて、従属変数を「全壊または大破」＋「中程度の損傷」／「軽微な被害」＋「無被害」の 2 分類とすることとし、独立変数として、先と同様に、切盛境界はカテゴリカルデータであるため「境界距離」で代替し、「盛土厚」，「現傾斜」，「盛土下傾斜」，「凸指標」に加えて投入した。

その結果は、表 13 のとおりで、ステップワイズ法により、2 変数が有意な独立変数として選ばれた²⁷。これにより、盛土下傾斜が大きいほど、切盛境界推定線に近いほど（距離が小さいほど）、中程度の損傷以上の大きな被害になりやすいことがわかる。優比は、大きな被害になる確率が、盛土下傾斜が 1° 大きくなるごとに 1.032 倍、切盛境界から 1m 遠ざかるごとに 0.956 倍（10m 遠ざかるごとに 0.64 倍）になることを示している。切盛境界部での不同沈下等が数多く発生し、上述した被害分布になったことが推定される。

そして、分割値を 0.20（20%）としたとき、このモデルの的中状況は表 14 のとおりであり、全体の正分類率は 68.9%である。釧路の事例と比べて正分類率はやや低い。先述のとおり本地区では切土部に戸建て住宅が少ないために、全体としての判別結果を悪くしているものと考え

²⁷ 村山（2006b）では、境界距離と盛土厚が選択され、この結果とは異なる。今回は GIS 利用技術が向上したこと、盛土下傾斜の求め方を一部変更したことが原因と考えられる。先のクロス集計結果と併せて考えると、今回の結果の方がより納得できるものである。

えられる。

図 53 は、この回帰式に基づいて建物被害予測確率の分布を示したものである。中程度以上の被害建物は、概ね予測確率の高いエリアに含まれるが、盛土の厚い谷底部（境界から離れかつ盛土下傾斜も小さい）等にも認められる。

3. 3 判別モデルについてのまとめ

ステップワイズ法によって選択された独立変数についてはその回帰モデルは、事例地区ごとに異なる²⁸。

釧路と比べて、神戸の被害率はずっと高い。表 15 は、地形とその改変に関する指標群を比較したものである。これによると、神戸の事例地区は、盛土厚、盛土下傾斜ともに釧路に比べて大きく、地形改変の度合いが大きいことが分かる。先述のとおり神戸では他にはない形態として、複数の建物を載せた谷の盛土が移動（滑動）したのがあるが、これはまさに盛土下傾斜が大きいことと関係していると考えられる。そのような盛土の移動を含む大きな変動が、結果として切盛境界付近に不同沈下等を集中させ、多くの建物に被害を及ぼしたと、想定することができる。釧路の場合は、これに比べて地形改変の程度が小さい中で、切盛境界部での被害集中に加えて（境界距離は回帰式に選択されなかったが）、盛土の崖の崩壊や変状が家屋被災につながったものが複数認められ、それらがモデルに反映していると考えられる。加えて、それぞれの被害率が大きく異なることを反映して、2 つのモデル式から導かれる建物被災予測確率の数値自体にも大きな差がある（図 41, 53）。

いずれにせよ、2 つのモデル式には大きな違いがあり、地形改変地の建物被災予測を行うに当たっては、現段階では、それぞれのモデル式に基づく 2 種類の予測をせざるを得ない。

4. モデルによる予測の試み — 柏崎と東京 —

4. 1 柏崎

柏崎は、2007 年新潟県中越沖地震で被災し、砂丘とその周辺に展開する中心部における液状化を伴う被害が注目されたが、郊外の丘陵地に造成された住宅団地でも被害が認められた。ただしここでは、先述のとおり建物被害データが未入手であるため、本システムを用いて地形改変地の土地条件評価のテストフィールドとして検討する。

(1) データ

²⁸ 他の 2 事例（釧路市桜ヶ岡地区、福岡市東区）を含めて 4 事例を検討した村山（2006b）の結果では、事例ごとの独立変数の数は、1～3 つで、かつ事例ごとに異なる。

当地区については、国土地理院から地形改変前後のブレイクラインデータの提供を受けた（国土交通省国土地理院地理調査部防災地理課，2008）。それらは，1961年および2007年撮影の空中写真から直接生成されたデータである（図54）。これをもとに，本システムを用いて一連の土地条件指標を生成し，また予測を行う。そして，筆者らが地震直後と1年後に実施した現地調査に基づく地盤変状の分布図を，予測結果と重ねて比較検討する²⁹。

(2) 結果と考察

図55は，切盛推定厚と地盤被害の分布を示したものである。他の事例とまったく同じく，被害が盛土部，境界部付近に集中していることが明らかである。

図56は，釧路と神戸の回帰式を用いて建物被災予測確率をグリッドごとに求めたものである。2つの図はかなり異なる様相を呈しているが，地盤被害は，神戸の回帰式にもとづく予測図で確率が高いと判断された切盛境界部に確かに多く存在するが，図の中央部ではこれらの分布に明らかな齟齬が認められる。一方，釧路の回帰式で求めた予測図との対応は，あきらかにこれより明瞭といえよう。本地区の中央部では，実際はアスファルトの段差を伴わない亀裂や補修跡が多く，本地区の北部と南部で認められた建物にも被害が及ぶような大きな地盤被害はほとんど無い。釧路の回帰式による予測図は，この部分が周囲より少し確率が高い様子を示しており，被害実態との対応について納得できる結果である。

先に見た表15によると，当地区の地形改変の状況は，釧路と神戸の事例地区の中間でかつ釧路により類似していると判断でき，上の結果とも整合的である。ただし，本システムは建物被災予測を意図したものであり，地盤被害状況との整合性のみでもってその有効性は検証できない。しかし先に述べたように，建物被害は地盤破壊に伴う（ことが多い）ことも明らかであり，この検討は一定の意義を有する。

4. 2 東京

東京都内で，地形改変前の大縮尺地形図が入手できない比較的古い開発地をテストフィールドに選択した。なお，以下の検討は実際の被害によって検証されているわけではないので，本地区の詳細については割愛する。

(1) データ

1947, 48年米軍撮影の約1/10,000空中写真から図化した等高線および東京都DMデータの等高線を用いて新旧DEMを生成し（図57），本システムを用いた一連の作業を行った。

(2) 結果と考察

²⁹ 2007年7月，2008年8月 村山良之，川村宇史，阿部圭太，斎藤友貴の現地調査による。

ここで求められた切盛推定厚は、最大値でも平均値でも釧路を上回るが神戸ほどではない(表 15, 図 58)。盛土下傾斜も釧路と神戸の間であるが、凸指標は 4 事例のうちで最大である。この地域の原地形は釧路と同様に段丘面に起源を持つ丘陵地で、谷地形の発達程度や段丘崖(開析斜面)上端の凸地形の存在、厚い火山性堆積物(関東ローム層)の存在など、釧路との共通点が多い。以上から、当地区は、2 つの建物被災予測図(図 59)のうち、どちらかという釧路の回帰式にもとづく予測図により近い分布の建物被害が想定できよう。

このような地図は、宅地造成前の大縮尺地形図が入手できない場合、空中写真から地形データを作成しなければならず、その作成に一定の手間と経費がかかる。しかし、ボーリングなどのような原位置試験作業を行う必要はなく、ほぼ一筆ごとの解像度で地震被害の予測評価が可能であることが利点である。大規模に造成された住宅地の地震ハザードマップとして効果的なものであると考える。

5. おわりに ーまとめと課題ー

以上の検討によって明らかになった点をまとめると以下のとおりである。

地形改変前後の大縮尺地形図の等高線から DEM を生成して、またとくに地形改変前の大縮尺地形図が入手できない場合においては空中写真を利用して DEM を生成して、これを GIS に取り込んで統計的分析にいたる一連のプロセスについて、これまでの筆者の検討によってその実効性を確認したところであるが、今回は、それらのうち GIS 関連の作業の大部分を自動化した。そのなかで、土地条件指標群の生成手法を再検討し、とくに GIS の専門技術者の協力を得たことで、土地条件指標の一部について改善できた。さらに、GIS の外部で求めた建物被害判別(予測)回帰式を取り込むことで、その結果の地図化作業までを含む地形改変地土地条件評価システムを構築した。

以上に沿って、釧路、神戸の 2 事例地区における戸建て住宅等の建物被害について、地形改変に関する土地条件指標群と建物被害との関連を、クロス集計とロジスティック回帰分析によって、(再)検討した。その結果、釧路の分析からは、盛土厚が厚いほど、盛土下の原地形の傾斜が大きいほど、そして凸指標が大きいほどつまり崖上等であるほど、全半壊といった激しい建物被害が発生しやすいこと、また神戸の分析では、中程度以上の激しい建物被害が、切盛境界推定線からの距離が近いほど、盛土下傾斜が大きいほど発生しやすいことを明らかにした。これらの観測値と回帰式による予測値との整合性をみると、おおむね各対象地区全体の被災率を分割値とした場合、70%程度以上の的中率が得られた。建物の条件や地質条件等をまったく考慮しないで、地形改変および地形関連の指標のみでこれだけの判別が可能ということは、地形とその改変が地震に対する土地条件としていかに重要な指標であるかを(改めて)示

したといえよう。

ただし、上述のとおり建物被害と強く関連する土地条件指標（すなわち回帰モデル式）が釧路と神戸の 2 事例で異なっている。（改変前後の）地形の違いに加えて、地盤破壊の様式や地質さらには建物の堅牢度が関連していることが想定できるが、これらの回帰式の差異や共通性についての定量的説明は現段階ではできない。

そこで、2 つの回帰式を用いて、柏崎と東京の事例地区で建物被災予測を試みた。それらの地形および改変の程度から類推すると、いずれの地区も釧路の回帰式に基づく予測確率分布の方がより適当と考えられる。柏崎の（建物被災ではなく）地盤被害分布との重ね合わせからも、釧路の回帰式による予測図の方が当てはまりが良いと判断できる。

以上の検討から、地形改変地の地震ハザードマップの作成方法について、一定程度前進させることができたと考える。

さて、2006 年改正の宅地造成等規制法に依って造成宅地防災区域を指定する過程において、釜井・守随（2002）および釜井他（2004）が提案した谷盛土全体の移動（滑動）の発生予測手法が、提示（例示）されている³⁰。本研究で検討してきた事例から明らかなように、そのような被害発生形態とは異なる、すなわちより小規模な不同沈下等で建物が被災する場合が数多く発生しており、この政策の対象範囲外に課題が残っていると考える（村山，2006a）。

釜井らの手法も本研究も、基本的には土地条件指標群による被災可能性の統計学的（経験的）予測モデルであり、一方で近年、盛土地盤破壊等のメカニズムの検討が始まった（たとえば郷他，2004；釜井他，2005；若井他，2005；福武他，2005）。これらの研究成果の蓄積が、本研究のような広域を対象とする統計学的モデルの予測精度を向上させる 1 つの鍵になると考える。たとえば、本研究で明らかに欠如している地質条件を含む、予測に用いるべき土地条件指標の取舍選択に寄与するであろう。

建物に関する独立変数（構法，建築年数等）が必要であることも明らかである。むしろ、予測における大きなノイズともいえる建物堅牢度等のバラツキが明らかな建物被害を従属変数として使うよりも、そもそも地盤破壊を伴う建物被害が想定されているのであるから、地盤破壊そのものを従属変数とすることも、検討すべきだろう。本研究で提示した柏崎の予測結果と地盤被害分布との対応をみると、これは今後優先的に検討すべき事項と思われる。ただし、地盤破壊をどのように従属変数として取り込むかは大きな問題である。

以上の検討は、現段階では事例ごとに異なる回帰モデルの統一または合理的使い分けに繋がることになると思う。そしてこれは、地形改変地の地震ハザードマップの作成方法を大きく

30 釜井らは、盛土部移動（滑動）の有無に関してきわめて明瞭に分類可能なモデルを提示しているが、実際の盛土部移動有無の判定や、谷盛土形状の計測方法が、完全に客観的とはいえない面がある。

改善することになる。

さらに残された課題としては、地形改変把握に関する精度の問題がある。大縮尺地形図とくに旧版地形図の精度（水平，垂直精度），空中写真とくに古い空中写真から DEM 生成の精度（レンズパラメータ，GCP 確保，写真鮮明度，樹木高）等が問題である。

土地条件指標群による予測結果と実際の建物被害との齟齬については，単なるデータの不備によるものだけでなく，たとえば被災可能性の高い土地条件であるにもかかわらず被災しなかった場合の建物の条件等，豊かな情報が埋もれていると考えられる。

謝 辞

杉村義広先生（当時東北大学大学院工学研究科）および研究室スタッフ，院生との共同研究は本論の源になった。柏崎の新旧地形データは，国土地理院から提供いただいた。現地調査は本文に挙げた多くの方々との共同で行ったものがほとんどである。

以上の方々に，心から感謝したい。

文 献

- 阿部隆・村山良之 1982. 仙台周辺の地形改変と都市問題. 地理 27(9) : 44-51.
- 秋山実 2001. 『写真測量』山海堂.
- 天国邦博・望月利男・荏本孝久・鏡味洋史・岡田成幸 1994. GIS を用いた 1993 年釧路沖地震の震度分布と被害評価手法に関する研究. 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集 2239-2244.
- 浅田秋江 1982. 宅地造成地盤の地震時危険度の予測法と防止工法に関する研究. 土質工学会論文報告集 22(4) : 191-202.
- 浅田秋江 1994. 都市周辺における丘陵地宅地造成地の地震危険度に関する研究(1978 年宮城県沖地震を例として).
- Booth, R. 2000. 『ArcGIS 3D Analyst ユーザーズガイド』ESRI.
- 藤岡達也 1996. 兵庫県南部地震による宅地造成地の地盤災害－阪神地域の被害事例の検討から－. 地理学評論 69 : 518-530.
- 藤原健蔵 2002a. 2001 年芸予地震の地震動特性と木造住家被害(1). 広島経済大学研究論集 25(1) : 49-76.
- 藤原健蔵 2002b. 2001 年芸予地震の地震動特性と木造住家被害(2). 広島経済大学研究論集 25(2) : 1-48.
- 藤原悌三・鈴木有・北原昭男 1994. 木造建物の地震被害が軽微に済んだのはなぜか？－(その 1)1993 年釧路沖地震の場合－. 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集 : 43-48.
- 福井巧 1996. 宅造地の土地条件と地震における家屋被害－1995 兵庫県南部地震－. 1996 年東北大学理学部地理学教室卒業論文.
- 福武毅芳・堀田洋之・尾上篤生 2005. 切盛地盤の三次元等価線形解析による安定性の検討. 宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム発表論文集（地盤工学会） 39-46.
- 福和伸夫・荒川政知・西阪理永 1998. 国土数値情報を活用した地震時地盤増幅度の推定. 構造工学論文集 44B : 77-84.
- 古川史郎 1980. 釧路. 山口恵一郎他編『日本図誌大系 I』424-428, 朝倉書店.
- 古舘守通・渡邊孝志・阿部英志・横山隆三 2000. 数値標高モデルの生成に用いる補間手法の性能評価. GIS－理論と応用 8 : 29-38.
- 古谷野亘 1988. 『数学が苦手な人のための多変量解析ガイド』川島書店.
- 郷孝之・笠原亮一・釜井俊孝 2004. 大型振動台模型実験による谷埋め盛土斜面の変形挙動の検討. 地すべり 40 : 400-407.
- 平野信一・松本秀明・村山良之・増田聡 2004. 2003 年宮城県北部の地震による旭山丘陵の地盤変状と被害. 東北地域災害科学研究 40 : 89-94.
- 堀田報誠 1996. 地形と地質. 『平成 6 年(1994 年)三陸はるか沖地震災害調査報告書』 47-56, 地盤工学会.

- 石川浩次 1995. 兵庫県南部地震による建造物の被害と地形・地質および地盤条件. 地質ニュース 491 : 17-23.
- 釜井俊孝・守随治雄 2002. 『斜面防災都市－都市における斜面災害の予測と対策－』理工図書.
- 釜井俊孝・守随治雄・笠原亮一・小林慶之 2004. 地震時における大規模宅地盛土斜面の不安定化予測. 地すべり 40 : 389-399.
- 釜井俊孝・鈴木清文・磯部一洋 1996. 平成 7 年兵庫県南部地震による都市域の斜面移動. 地質調査所月報 47 : 175-200.
- 釜井俊孝・Trandafir, A. C.・村尾英彦 2005. 2004 年新潟県中越地震による郊外住宅地の斜面災害. 宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム発表論文集(地盤工学会) 17-24.
- 菅野英幸 1996. GIS を用いた地盤条件の地震被害への影響に関する研究. 東北大学大学院工学研究科建築学専攻 1995 年度修士論文.
- 菅野英幸・杉村義広・若松和寿江・村山良之 1995. GIS を用いた 1993 年釧路沖地震における家屋被害の分析－人工的地形変化の影響について. 第 30 回土質工学研究発表会概要集 137-140.
- 笠原稔 1995. 文部省科学研究費突発災害調査研究成果報告書『平成 6 年(1994)北海道東方沖地震およびその被害に関する調査研究』.
- 川崎輝雄・野村亮太郎・大矢真也 1996. 墓石の転倒からみた兵庫県南部地震の被害分布とその地形環境. 地理学評論 69 : 39-50.
- 小荒井衛・長谷川裕之 2008. 宅地防災対策への時系列的地理情報の利活用. 地学教育と科学運動 58・59 合併 : 51-58.
- 小林基夫・須長博明・市川清次 1980. 地形条件と地盤災害についての調査研究. 「1978 年宮城県沖地震」に関する特別報告書 131-173, 科学技術庁研究調整局.
- 神戸市・建設工学研究所 1999. 『阪神・淡路大震災と神戸の地盤－神戸 JIBANKUN の構築ならびに地盤と被害の分析－』建設工学研究所.
- 国土交通省国土地理院地理調査部防災地理課 2008. 『地盤の脆弱性把握のための盛土・埋土地形データ作成に関する検討業務報告書』
- 国土交通省 2005. 総合的な宅地防災対策(総合的な宅地防災対策に関する検討会報告(案)). http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/04/040125_2/01.pdf (2007/2/11).
- 林舟・小口高 2002. 地形学における写真測量の応用－欧米の事例を中心に－. 地学雑誌 111 : 1-15.
- 正井泰夫・佐藤恒雄 1982. 日本の市街地の地形的立地条件. 人文地理学研究(筑波大学) 4 : 51-64.
- 村山良之 1980 宮城県沖地震による仙台周辺の住宅地における被害－住宅地の地震に対する土地条件－. 東北地理 32 : 1-10.
- 村山良之 1994. 地震と地盤. 仙台市史編さん委員会編『仙台市史特別編 自然』470-482, 仙台市.
- 村山良之 1996. 地形変化と被害分布の関係. 『平成 6 年(1994 年)三陸はるか沖地震災害調査報告書』249-258, 地盤工学会.
- 村山良之 1997. 文部省科学研究費基盤研究成果報告書『GIS を用いた人工的地形変化地の地震に対する土地条件評価に関する研究』.
- Murayama, Y. 1998. Housing Estates Developments and Earthquake Hazards -Some Recent Cases in Japan-. Journal of the Korean Geographical Society 33: 739-744.
- 村山良之 2004. 2003 年宮城県北部の地震－災害の経験から明らかになったこと－. 地理 49(9) : 32-37.
- 村山良之 2005. 建物被害状況からみた新潟県中越地震災害の特等－住家被害を中心に－. 日本地理学会

- 発表要旨集 67 : 8.
- 村山良之 2006a. 「総合的な宅地防災対策」に期待すること. 日本地理学会発表要旨集 69 : 152.
- 村山良之 2006b. 文部省科学研究費基盤研究成果報告書『デジタル写真測量と GIS を用いた地形変化の測定と土地条件評価に関する研究』.
- 村山良之・藤原健蔵 2001. 2001 年芸予地震による被害分布の特徴 (発表要旨). 季刊地理学 53 : 195-196.
- 村山良之・黒木貴一 2006. 2005 年福岡県西部の地震による地形変化地における被害 (発表要旨). 季刊地理学 58 : 46-47.
- 村山良之・増田聡・福井巧・川口裕輔 1995. 宅造地の人工的地形変化と地震被害—神戸市垂水区の事例—. 日本地理学会予稿集 48 : 34-35.
- 村山良之・菅野高弘 1994. 1993 年釧路沖地震の被害と人工的地形変化. 田村俊和編『東北大学特定研究 地域開発に伴う環境変化の地理学的研究』54-64, 東北大学理学部.
- 日本建築学会 1993. 『Earthquake motion and ground conditions: in commemoration of the 20th anniversary of the Research Subcommittee on Earthquake Ground Motion, the Architectural Institute of Japan』日本建築学会.
- 日本リモートセンシング協会 1992. 『図解リモートセンシング』日本測量協会.
- 西村嘉助・瀬川秀良・水野裕・堀田報誠・三浦修・田村俊和・赤桐毅一 1968. 十勝沖地震による地形災害. 東北地理 20 : 157-160.
- 野上道男 1991. 等高線地図から DEM を作成する一方法. 地図 29(3) : 20-26.
- 落合衛・源栄正人・大野晋 2003. 5 月 26 日宮城県沖の地震における宮城県域のアンケート震度調査. 日本地震工学会大会 2003 梗概集 114-115.
- 岡崎由夫 1966. 『釧路の地質』釧路市.
- 大野裕幸・田村栄一 2002. 2 万 5 千分 1 地形図ベクトルデータによる DEM 生成方法について. 国土地理院時報 99 : 33-38.
- 小野里啓 1997. 宅地造成地における地震被害に関する基礎的研究. 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 1996 年度修士論文.
- 小野里啓・杉村義広・菅野英幸 1998. GIS を用いた 1993 年釧路沖地震による宅地造成地の家屋被害の要因分析. 日本建築学会構造系論文集 504 : 57-64.
- 大竹一彦 2002. 『新版 2 万 5000 分の 1 地形図デジタル化時代の地図』古今書院.
- 齋藤光格 1965. 都市的土地利用の土地基盤—都市地理学における地形図の 1 つの意義. 地図 3 : 157-166.
- 酒井多加志 2006. 地形図と写真から見た昭和期の釧路の炭砒. 釧路市史研究 5 : 2-21.
- 笹谷努 1994. 釧路市における共同強震動観測. 『1993 年釧路沖地震に関する総合シンポジウム』13-20. 日本建築学会地震災害委員会.
- 鹿戸俊介・松村紀宏・杉村義広 2000. 宅地造成地における家屋の地震被害率予測に関する基礎的研究. 日本建築学会構造系論文集 534 : 65-72.
- 測量・地図百年史編集委員会 1970. 『測量・地図百年史』建設省国土地理院.
- 菅野高弘・村山良之・柳沢栄司 1993a. 平成 5 年(1993 年)釧路沖地震による地盤被害について. 第 28 回土質工学研究発表会概要集 1095-1098.
- 菅野高弘・村山良之・柳沢栄司 1993b. 1993 年釧路沖地震による地盤被害に関する一考察. 土木工学

- 会第 48 回年次学術講演会概要集 490-491.
- 杉村義広 1998. 地盤条件の地域差が地震動および地震被害性状に与える影響. 三陸はるか沖地震シンポジウム論文集 61-66.
- 須長博明・熊木洋太 1982. 地震地盤災害と地形分類. 国土地理院時報 56 : 24-31.
- 鈴木康弘・佐藤滋樹・野澤竜二郎 2002. 航空写真測量に基づく桑名断層の変位地形の解析—米軍撮影航空写真による活断層航測図化および GIS 情報の精度—. 活断層研究 22 : 76-82.
- 田結庄良昭 1996. 1995 年兵庫県南部地震による神戸市西部長田地域の地震災害と地質・地盤. 応用地質 37 : 40-47.
- 宅地防災研究会 1998. 『宅地防災マニュアルの解説 [改訂版]』ぎょうせい.
- 田村俊和 1979. 丘陵地における木造家屋の地震被害—被害タイプおよび被害発生に関与する地盤条件の時代による変化—. 総合都市研究 8 : 121-130.
- 田村俊和 1982. 全国的にみた大規模地形改変の実態. 地理 27(9) : 16-24.
- 田村俊和・阿部隆・宮城豊彦 1978. 丘陵地の宅地造成と地震被害—1978 年宮城県沖地震の被害を例として—. 総合都市研究 5 : 115-131.
- Tamura, T., Takeuchi, K. 1980. Land characteristics of the hills and their modification by man -with special reference to a few cases in the Tama Hills, west of Tokyo-. Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University 14/15: 49-94.
- 田村俊和・山本博・吉岡慎一 1983. 大規模地形改変の全国的把握. 地理学評論 56 : 223-242.
- 田代淳・石丸聡 1995. 1993 年釧路沖地震に伴う斜面の変動. 『兵庫県南部地震に伴う地すべり・斜面崩壊報告書』171-190, 地すべり学会.
- 東北大学理学部地質古生物学教室 1979. 1978 年宮城県沖地震に伴う地盤現象と災害について. 東北大学理学部地質古生物学教室邦文報告 80 : 1-81.
- 海津正倫 2004. 人工造成地のハザードマップをつくる—大縮尺図と EXCEL でつくる簡便な土地条件図. 地理 49(9) : 38-40.
- 若井昭彦・釜井俊孝・鶴飼恵三 2005. 高町団地における盛土崩壊事例の有限要素シミュレーション. 『宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム発表論文集』25-30, 地盤工学会.
- 若松和寿江・今村遼平・足立勝治 1994. 1993 年釧路沖地震による緑ヶ岡地区の構造物被害と地形改変との関係. 第 29 回土質工学研究発表会概要集 987-990.
- 矢嶋仁吉 1956. 『集落地理学』古今書院.
- 柳沢栄司・菅野高弘・村山良之 1993. 1993 年釧路沖地震による地盤災害. 文部省科学研究費突発災害調査研究成果報告書『1993 年釧路沖地震による災害の調査研究』75-85.
- 横田修一郎・仲津忠良 1996. 西宮市上ヶ原地区の例にみる兵庫県南部地震による盛土すべりと旧地形に対応した地表での地割れの変位. 地球科学 50 : 385-390.
- 吉岡敏和・宮地良典・寒川旭・下川浩一・奥村晃史・水野清秀・松山紀香 1995. 兵庫県南部地震に伴う阪神地区の被害分布と微地形. 地質ニュース 491 : 24-28.
- 2003 年十勝沖地震地盤災害調査委員会 2004. 『2003 年十勝沖地震地盤災害調査報告書』地盤工学会.

英文要旨

Study on evaluation of ground conditions of transformed land using GIS

MURAYAMA, Yoshiyuki ¹

KUMAKI, Yohta ²

¹Yamagata University

²Senshu University

The damage on the artificially transformed hills, for suburban residential estates, has been increasingly observed in earthquake disasters in recent years in Japan. Most of such damage is caused by ground failure rather than by strong ground shaking itself.

Five indices were selected as ground conditions of transformed land as the results of the former studies by the authors: Cut/Fill Boundary or Distance from the Cut/Fill Boundary, Thickness of Fills, Present Slope, Original Slope under the fill, and Convexity (difference in height between the center point of an area 25m in radius and the average height).

The ground condition evaluating system for transformed land (GEST) was built in GIS based on the former studies by the authors. The system was used for re-analyzing the sample area of Kushiro and Kobe, affected by big earthquake in 1993 and 1995 respectively. The logistic regression models accounting for housing damage by some ground conditions were extracted by the analysis. The models then were applied to other areas of Kashiwazaki and Tokyo on a trial basis in order to estimate probabilities of housing damage using the GEST built in GIS.

Other explaining variables, such as geological condition, architectural structures and so on, would enable more precise prediction by the model of the housing damage on transformed land.

Keywords: *Earthquake disaster, Transformed land, Ground condition, GIS, Logistic regression*

图表

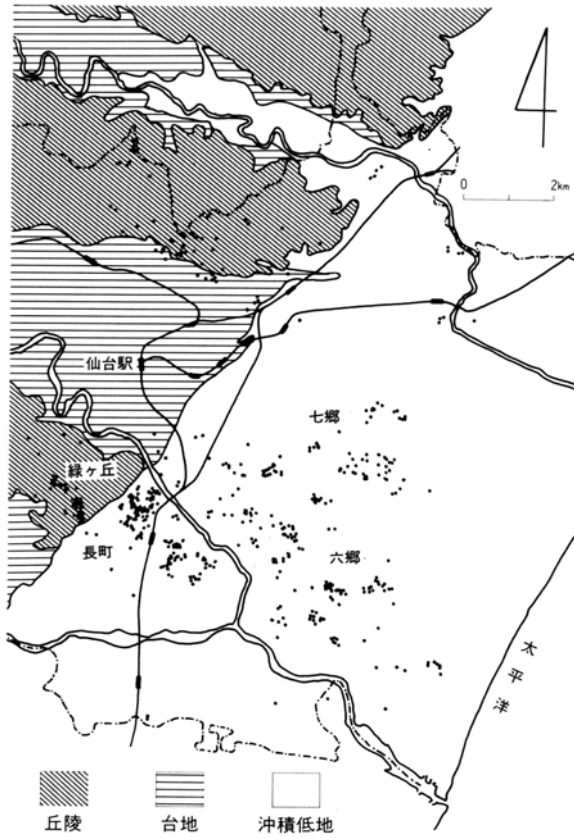


図 1 宮城県沖地震による全壊家屋の分布
 当時の仙台市の範囲
 仙台市資料にもとづいて地図化。
 村山(1994)による(一部改変)。

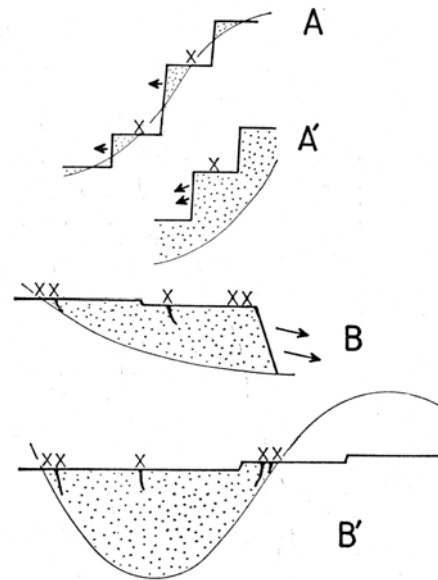


図 2 地形改変のタイプと地震災害

- A: 小規模な改変によって造成された団地
- A' : Aのうち開析谷を埋めた場合の縦断面
- B: 大規模な改変によって造成された団地(縦断面)
- B' : 同上(横断面)

太線: 改変後の地形, 細線: 改変前の地形
 矢印: 盛土の移動や崩壊, ×: 家屋等の被害
 田村(1979)にもとづいて作成したもの。
 阿部・村山(1982)による。



a 仙台市青山 盛土の擁壁の亀裂



b 仙台市青山 盛土の擁壁の崩壊



c 仙台市緑ヶ丘 盛土の崩壊



d 泉市南光台 切盛境界部の不同沈下
左側が盛土部



e 仙台市鶴ヶ谷 切盛境界部の亀裂と沈下
右側が盛土部

図 3 宮城県沖地震による被害
地名は当時のもの。1978年6-7月 筆者撮影。

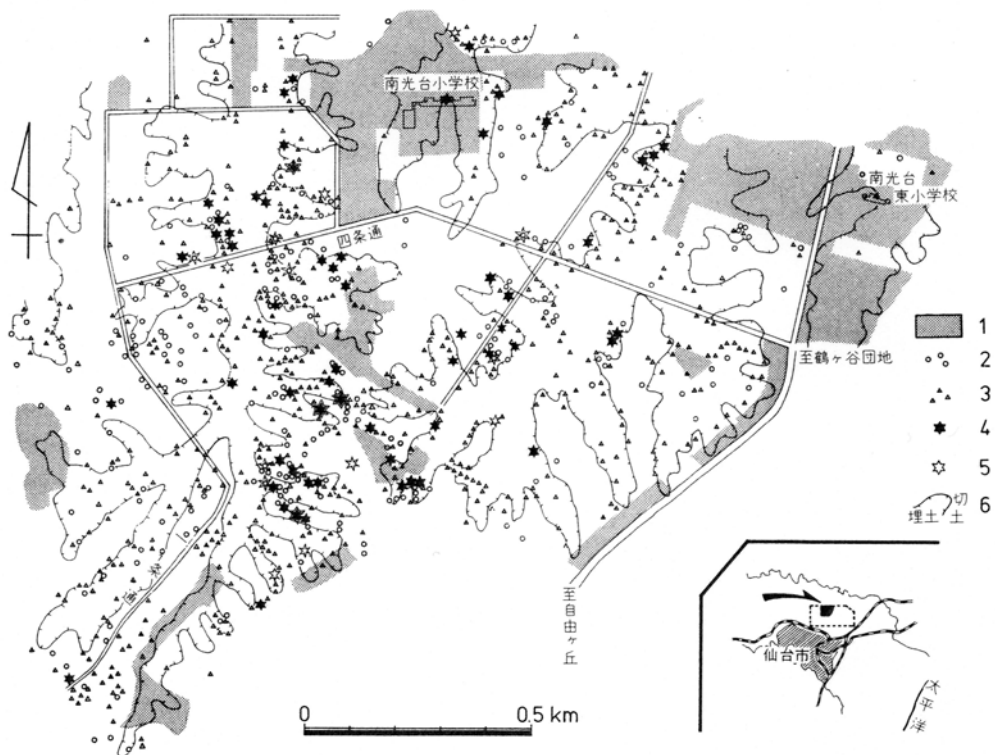


図 4 南光台の家屋被害分布

- 1: 宅地以外の土地(学校, 講演, ゴルフ練習場, 空地等)
- 2: 家屋外装に被害が認められるもの
- 3: 道路・宅地の亀裂や盛り上がり
- 4: 被害の著しい家屋
- 5: 全壊の指定を受けた家屋
- 6: 切土・盛土(埋土)の境界推定線(新旧 1/10,000 地形図から推定)

被害調査は, 菅沼, 村山, 齋藤, 吉永による。

村山(1980)による。

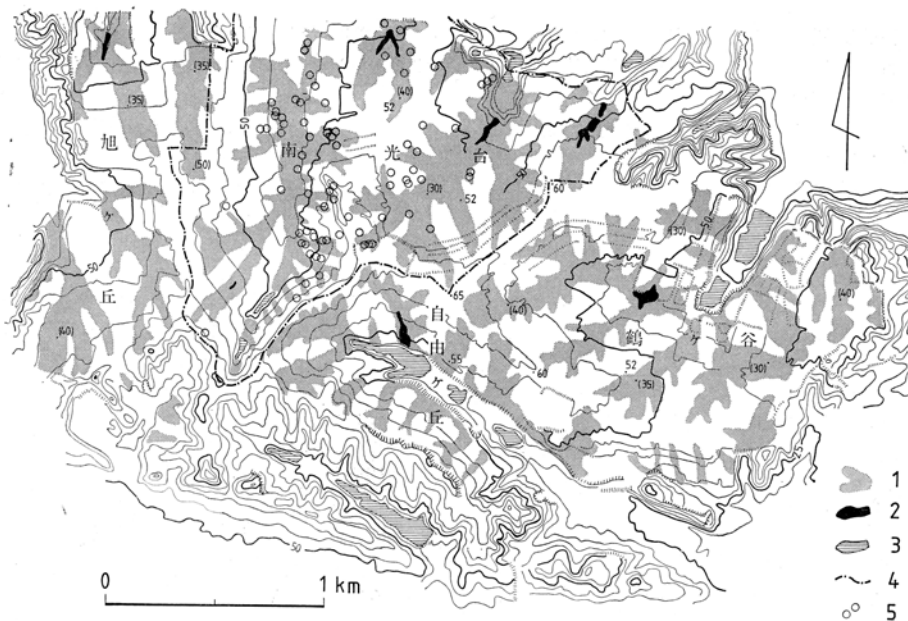


図 5 南光台の家屋被害とその周辺の地形改変

1:盛土(新旧 1/10,000 地形図から推定), 2:埋められた溜池, 3:溜池
 4:南光台(被害調査)の範囲 5:大きな被害を受けた家屋(全壊を含む)
 カッコ付きの数字は改変前の標高, カッコなしの数字と等高線は改変後(1970 年当
 時)の標高。阿部・村山(1982)による。

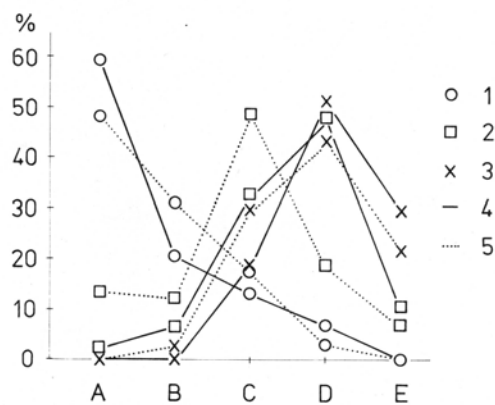


図 6 3つの団地における家具の転倒状況

1:南光台, 2:鶴ヶ谷, 3:松が丘 4:切土部 5:盛土部
 A:ほとんどあるいは全部倒れた B:半分くらい倒れた C:1, 2 個倒れた
 D:家具は倒れず棚の上のものが落ちた程度 E:無被害
 聞き取り調査による。村山(1980)による。



a 釧路市緑ヶ岡 盛土の崩壊



b 釧路市材木町 盛土の崩壊

c 釧路市武佐
わかくさ幼稚園脇の
盛土斜面の崩壊



図 7 釧路沖地震による被害

a~c の現地調査は、村山、菅野による。

a~c:1993 年 1 月 筆者撮影。



d 釧路市材木町 切盛境界部, 右側が盛土部, 不同沈下(玄関ドア下に隙間)



e 釧路市緑ヶ岡
切盛境界部, 左側が盛土部
コンクリート擁壁の亀裂



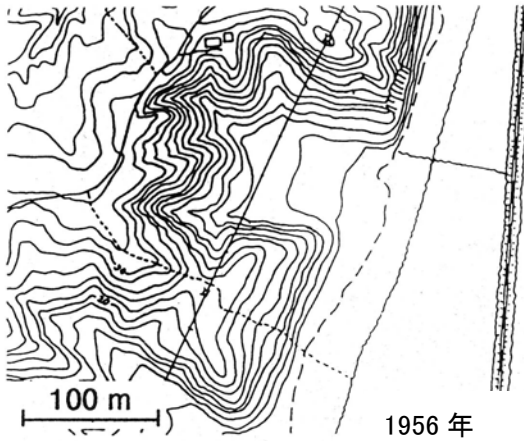
f 釧路市益浦
切盛境界部, 右側が盛土部, 道路亀裂
車庫の床が傾斜, 奥の母屋は無被害



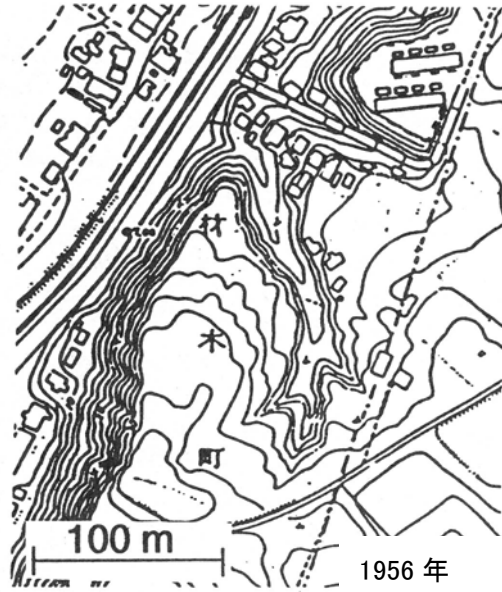
g 釧路市貝塚
切盛境界部, 右側が盛土部, 不同沈下による家屋の傾斜

図 7 釧路沖地震による被害(つづき)

d・e:1993年1月 f・g:同年8月 筆者撮影。



1956年



1956年



1987年



1987年

図 8 緑ヶ岡の崩壊と地形改変

上:1/3000 釧路市都市計画現況図

下:1/2500 釧路市都市計画図 (基図)

★:崩壊, 太線:切盛境界推定線

(新旧地形図から推定),

等高線間隔はいずれも 2m。

柳沢他(1993)による(一部改変)。

図 9 材木町の崩壊と地形改変

上:1/3000 釧路市都市計画現況図

下:1/2500 釧路市都市計画図 (基図)

★:崩壊 ■:被災家屋(傾斜等, 現地調査による)

太線:切盛境界推定線(新旧地形図から推定),

等高線間隔はいずれも 2m。

柳沢他(1993)による(一部改変)。



図 10 武佐の崩壊等と地形改変
 基図は 1987 年 1/2500 釧路市都市計画図,
 太線:切盛境界推定線(新旧地形図から推定)。
 柳沢他(1993)による。

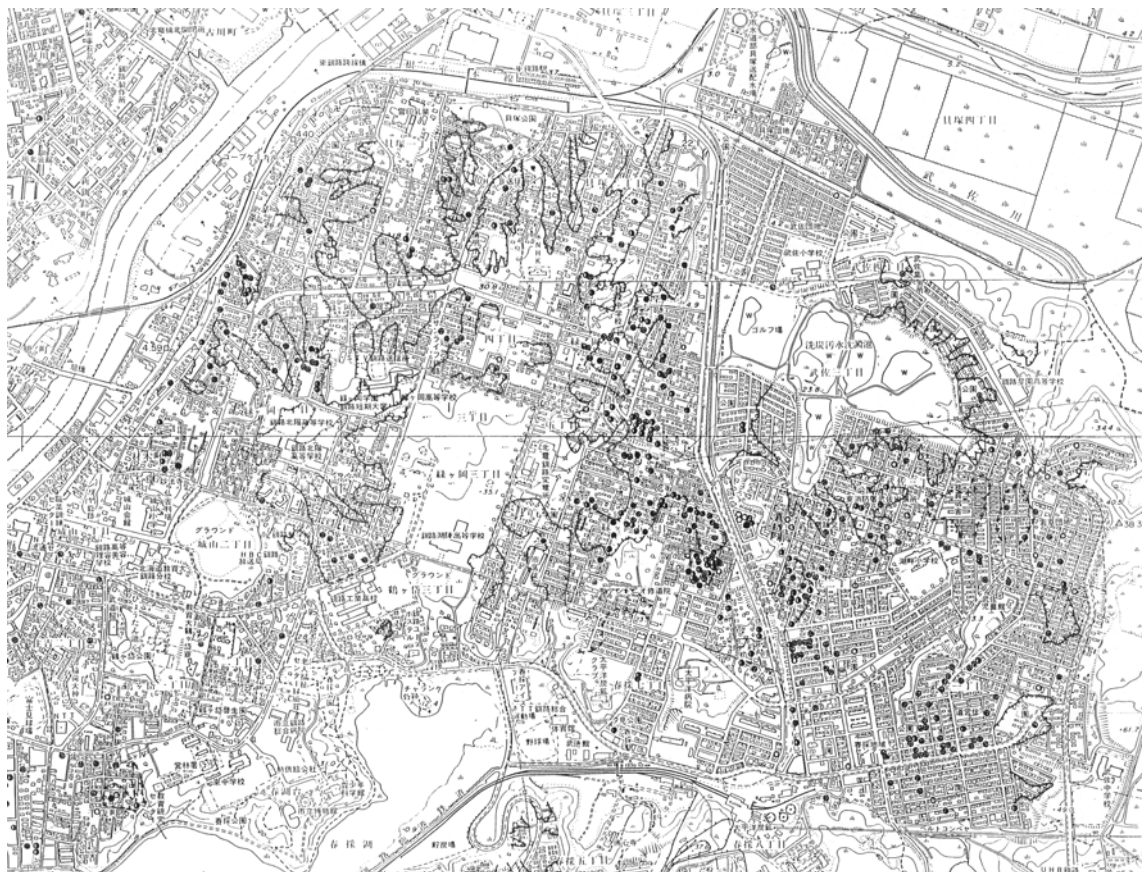


図 11 緑ヶ岡とその周辺の家屋被害と地形改変
 ●:家屋被害(釧路市による)太線:切盛境界推定線(新旧地形図から推定)。
 基図は 1/10000 釧路市都市計画図。村山・菅野(1994)による(一部改変)。



a 松ヶ丘の谷埋め盛土末端部の崩壊



b S 地区の全壊家屋 1

高さ約 2m の擁壁がわずかに傾斜
右: 左の写真の裏側から撮影



c S 地区の全壊家屋 2

上: 擁壁が倒れて宅地に亀裂
下: 擁壁の高さは 50cm 弱, 家屋の全景

d 是川の半壊家屋

上: 高さ約 1m の盛土 下: 基礎に亀裂

図 12 三陸はるか沖地震による被害
現地調査は、村山、松本、川口、平出による。
1995 年 2 月 筆者撮影。

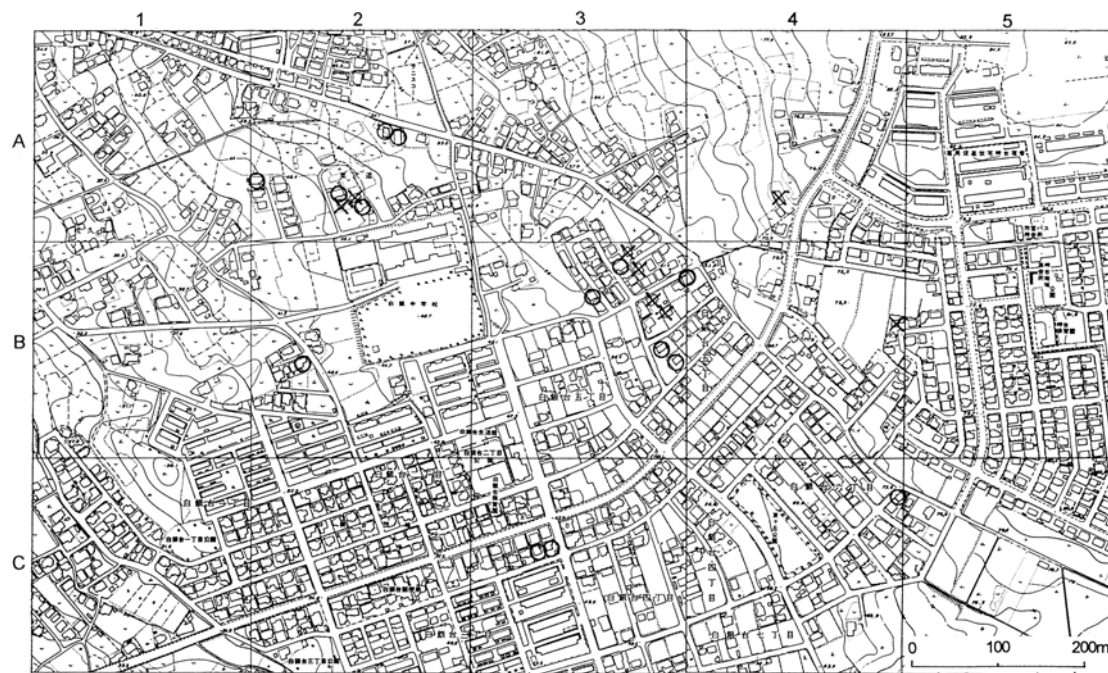
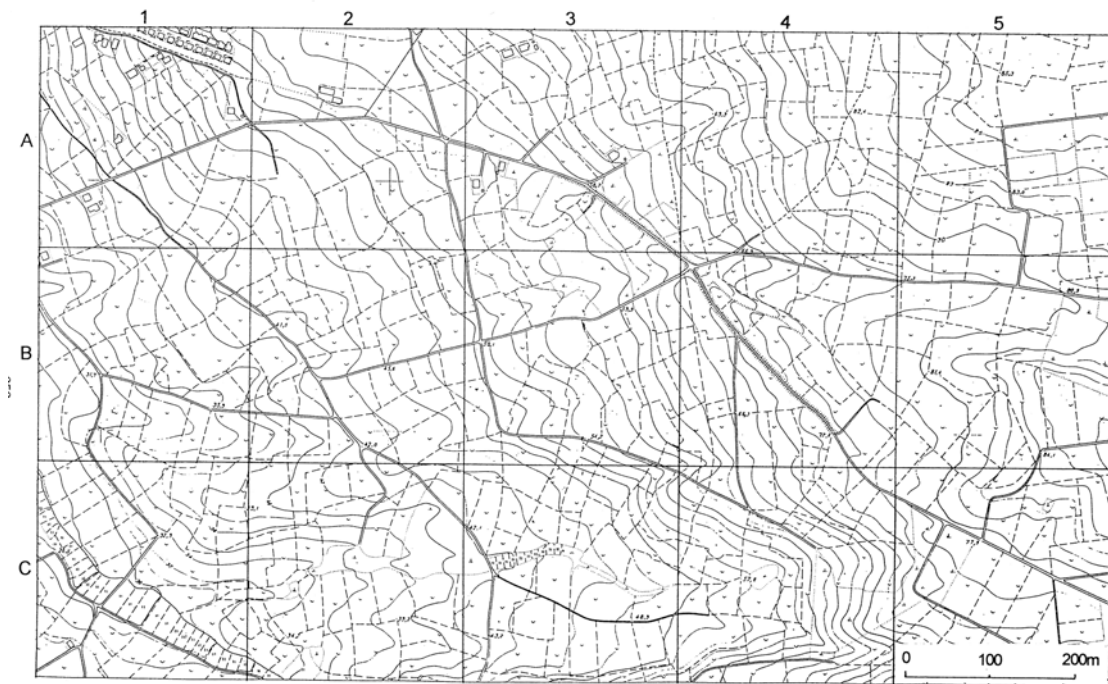


図 13 S 地区の新旧地形図と家屋被害

上:1964年 1/3000 八戸市都市計画図 下:1988年 1/2500 八戸市都市計画図(基図)

等高線間隔はいずれも2m, 新旧比較できるよう250m間隔のグリッドを記入した。

×:全壊 ○:半壊 (八戸市資料による)。村山(1996)による(一部改変)。



図 14 神戸市垂水区 A 団地における地形改変と建物被害分布
 基図は 1/2,500 神戸市都市計画図。
 新旧 1/2.5 万地形図から切盛境界線を推定。
 現地調査は, 村山, 増田, 川口, 福井による。
 村山他(1995)による(福井作図を一部改変)。



a(上) 神戸市垂水区 A 団地
切盛境界部, 左側が盛土部
不同沈下で家屋取壊し済み, 埋設管の修理跡



b(右) A 団地
手前の谷埋め盛土部全体が右方向に滑った



c A 団地
切盛境界部, 右側が盛土部,
段差のある亀裂, ガス管修理跡



d 垂水区 C 団地
切盛境界部か, 道路亀裂修理跡, 擁壁亀裂
団地内の被害は少なくごく局部的

図 15 兵庫県南部地震による被害
1995 年 3 月 筆者撮影。

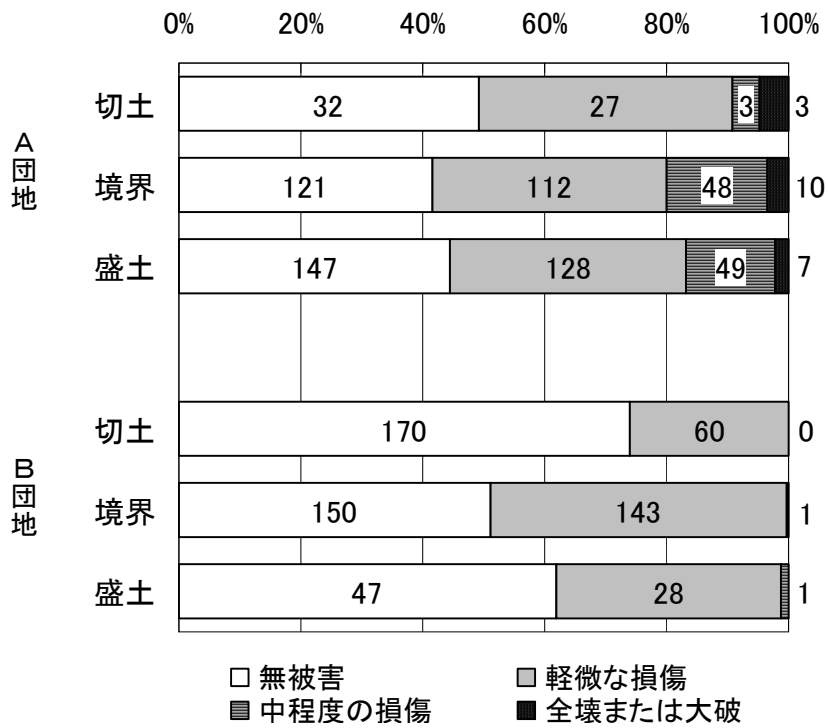


図 16 神戸市垂水区の2団地における地形改変と建物被害
 境界部は、切盛境界推定線から 20m 以内。
 村山他(1995)による(福井作図を一部改変)。



a(左) 呉市
階段アプローチ住宅地の被災
b(右) 同上
石積み擁壁の被災(シートの下)



c 広島市安佐南区
盛土部の沈下, アスファルト補修跡



d 広島市西区
切盛境界か, 擁壁と塀に亀裂, 道路補修跡



e 広島市安佐南区
切盛境界, 壁モルタルと基礎に亀裂



f 広島市安佐南区
切盛境界, 道路, 擁壁, 建物基礎に亀裂
右はその拡大写真

図 17 芸予地震による被害
2001年4月 筆者撮影。

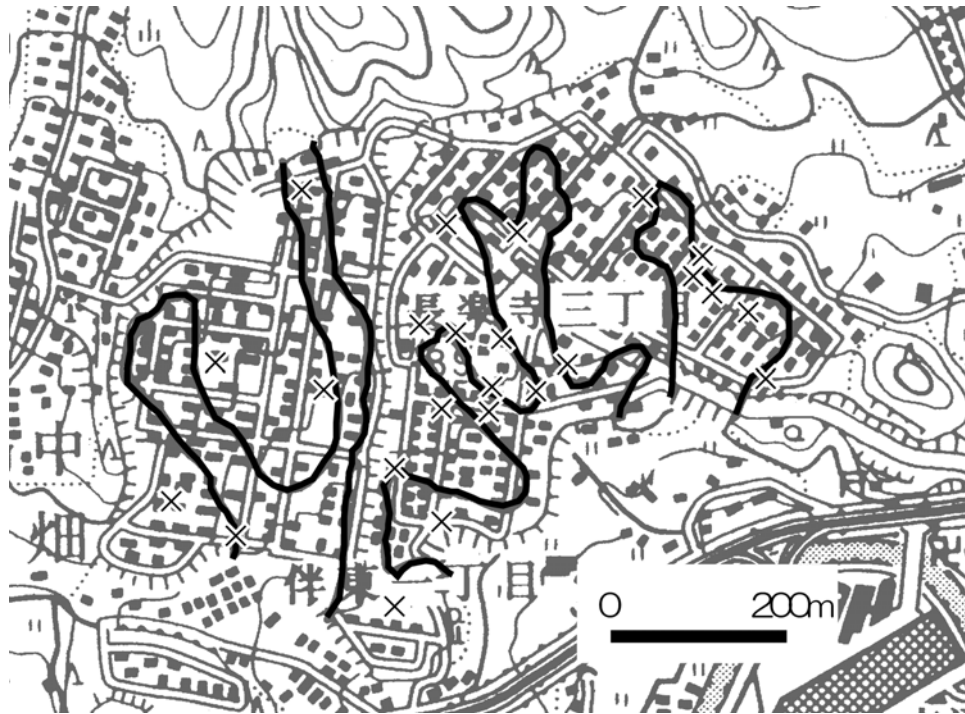


図 18 広島市郊外における地形改変と芸予地震による被害分布
 太線:切盛境界推定線(新旧の 1/25,000 地形図の等高線から推定)
 ×:道路や宅地の地盤変状および基礎等が被災した住宅
 筆者の現地調査による。
 基図として国土地理院発行 1/25,000 地形図「祇園」を使用。
 村山・藤原(2001)による(一部改変)。



a 旧河南町北村地区 盛土擁壁の崩壊



b 北村地区 右手前側盛土部の沈下



c 北村地区 左側盛土部の沈下と床下の亀裂



d 北村地区 築 200 年の無傷の母屋



e 旧矢本町大塩地区
盛土部, 道路亀裂と擁壁の隙間



f 大塩地区
切盛境界部, 道路亀裂

図 19 宮城県北部の地震による被害
被害調査は日本建築学会災害調査 WG による。
2003 年 7-8 月 筆者撮影。

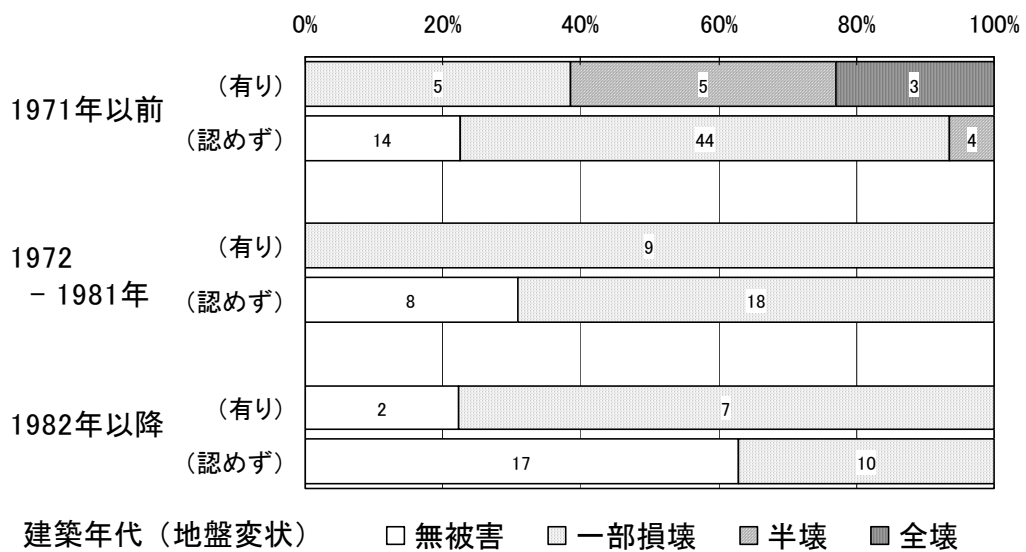


図 20 旧河南町北村地区における宮城県北部の地震による建物被害
 被害調査は日本建築学会災害調査 WG による。
 平野他(2004)による(一部改変)。



図 21 旧矢本町大塩地区における地形改変と宮城県北部の地震による被害

左 国土地理院 1/25,000 「広淵」の一部

1971 年修正測量および 2001 年修正測量

右 地震被害分布(日本建築学会災害調査 WG による)

×:道路亀裂など Δ:建物基礎亀裂など

太線:切盛境界推定線(新旧地形図により推定)

平野他(2004)による(一部改変)。



a 小千谷市 斜面の宅地崩壊



b 長岡市高町団地 無被害の切土部



c 高町団地 団地縁辺部の盛土の崩壊



d 長岡市長岡ニュータウン(青葉台)
切盛境界部, 道路の亀裂



e 長岡ニュータウン(青葉台)
切盛境界部か, 宅地に段差のある亀裂



f 長岡ニュータウン(陽光台)
液状化による車庫地盤隆起, 家屋傾斜



g 長岡市長峰団地
ブロック擁壁に亀裂

図 22 新潟県中越地震による被害
2004年10-11月 筆者撮影。

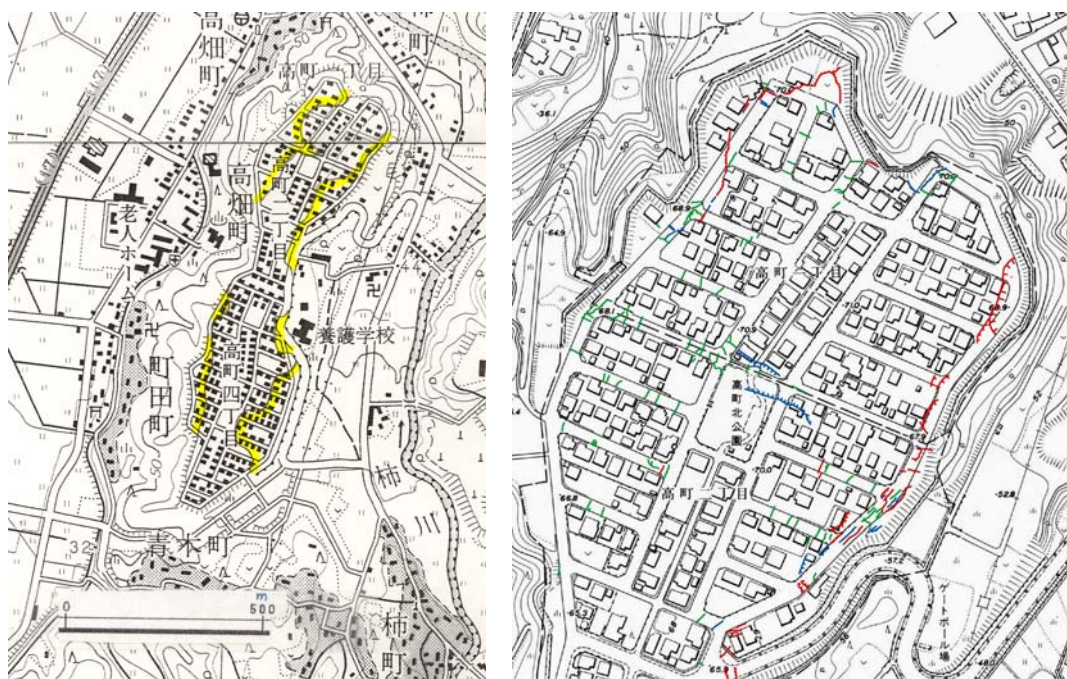


図 23 長岡市高町団地の地形改変と亀裂の分布(北部のみ)

左 地形改変 新旧 1/25,000 地形図から推定した盛土分布, 黄色が盛土側,
基図は国土地理院 1/25,000 地形図「長岡」「片貝」。

右 赤:開口 50cm 以上の亀裂, 青:開口 50cm 未満の亀裂, 緑:アスファルトのみの亀裂,
ケバ:明瞭な段差のある亀裂, 基図は長岡市発行 1/2500 都市計画図。

現地調査は, 村山, 吉田による。吉田作図。

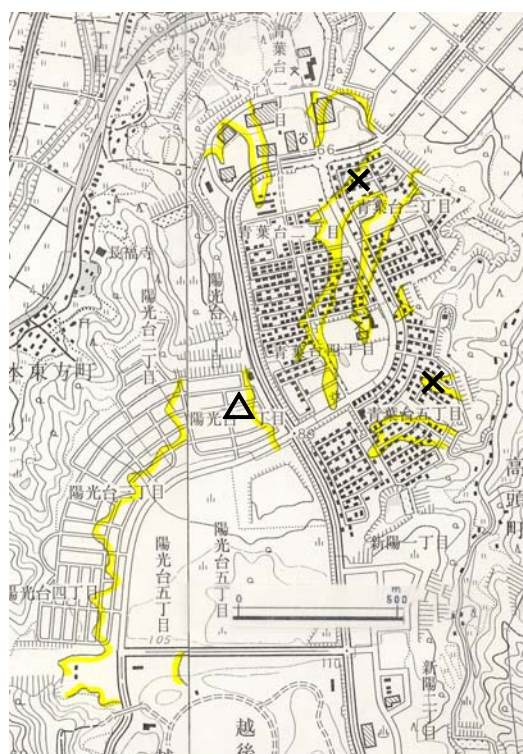


図 24 長岡市長岡ニュータウンにおける地形改変と被害の分布

新旧 1/25,000 地形図から推定した盛土分布, 黄色が盛土側。

×:道路や宅地の亀裂

△:液状化発生場所

基図は 1/25,000「西山」「長岡」。

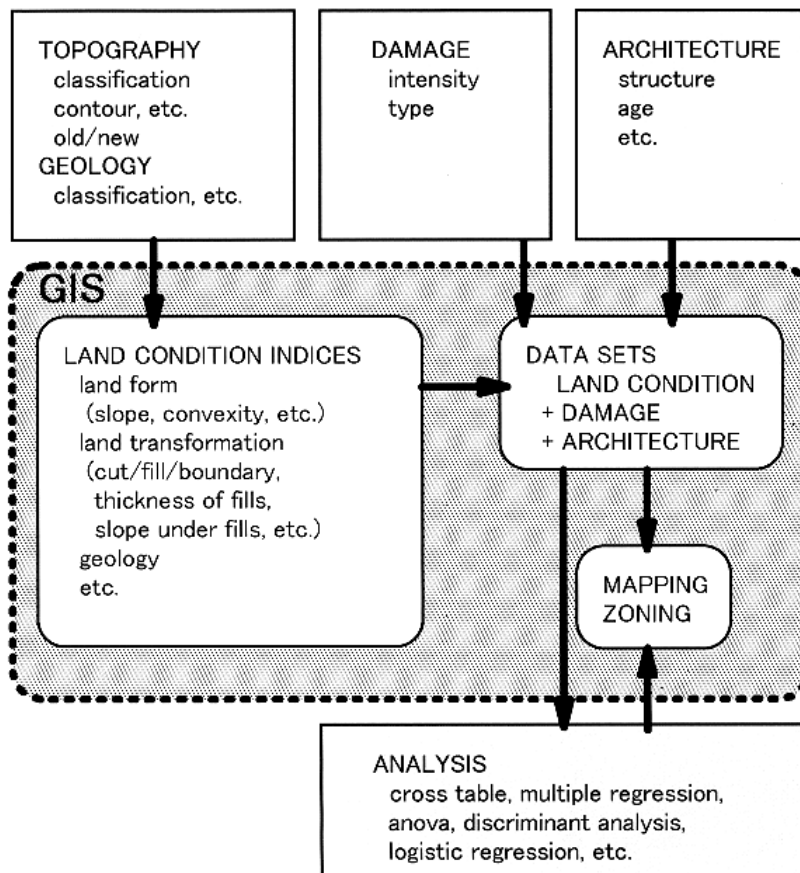


図 25 GIS を分析ツールとした建物の地震被災分析の枠組み
 小野里(1997)を一部改変したもの。Murayama (1998) による。

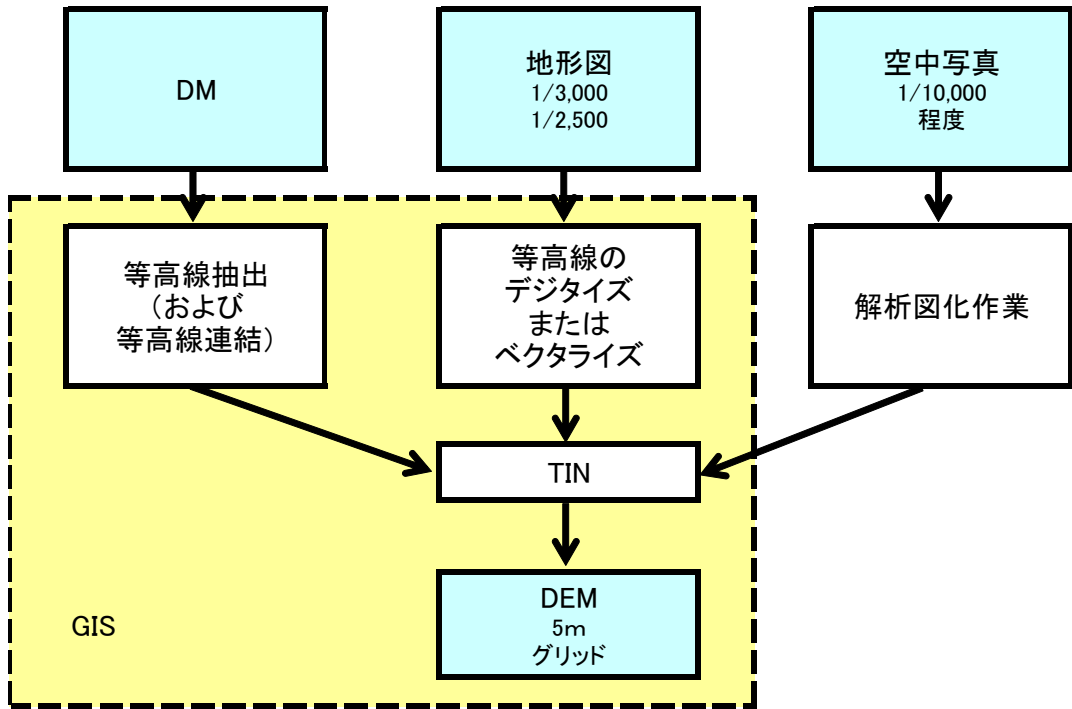


図 26 DEM 生成プロセス

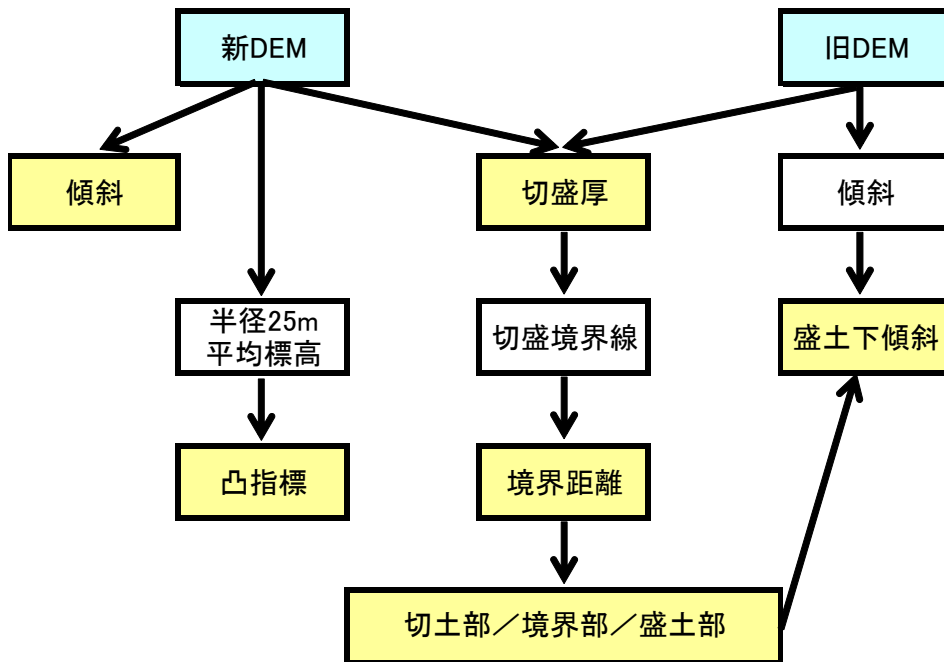


図 27 GIS を用いた土地条件指標導出プロセス

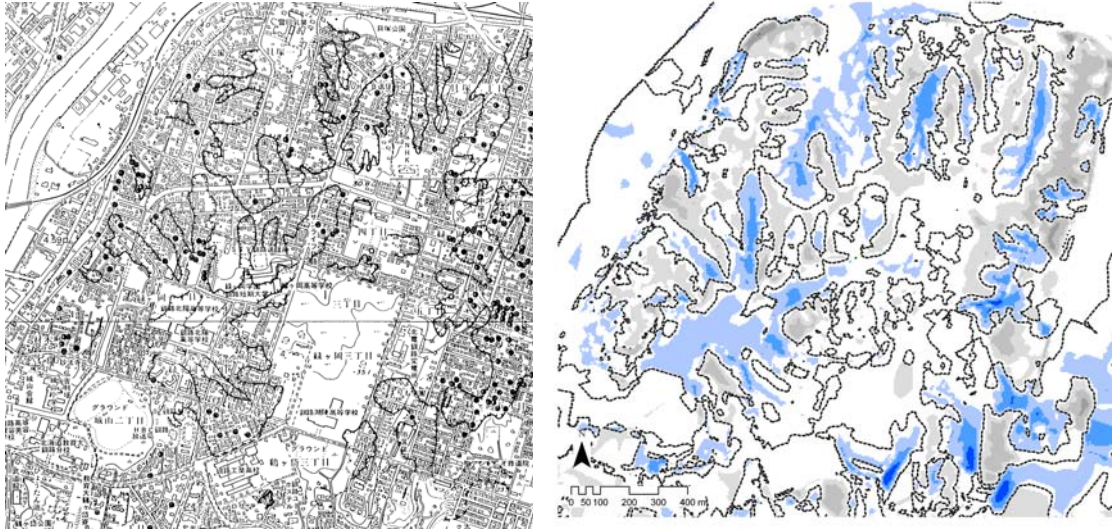


図 28 手作業と GIS を用いて推定した地形改変(釧路市緑ヶ岡地区)
 左:手作業による切盛推定線(黒丸は釧路市による建物被害)
 右:GIS による切盛(青:盛土厚, 灰色:切土厚, 灰色破線:切盛境界推定線)

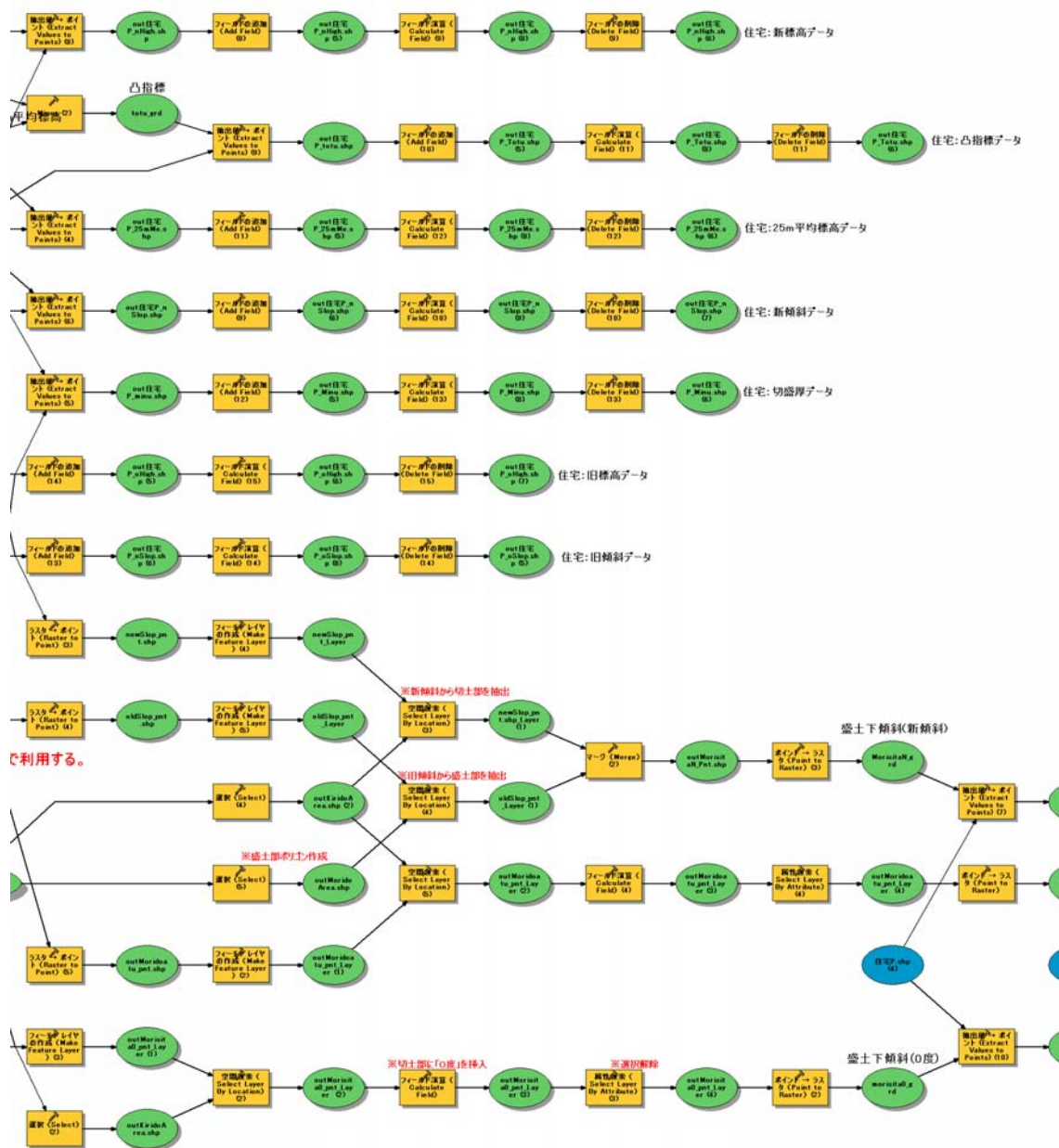


図 29 地形改変地土地条件評価システム(つづき)

① 土地条件指標ツール(3/4)

-夕



標高データ

-夕

-夕

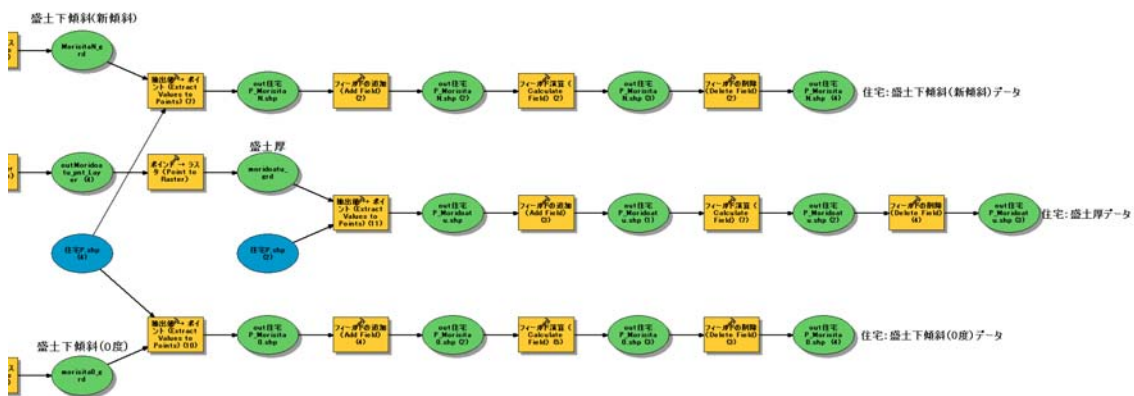


図 29 地形改変地土地条件評価システム(つづき)

① 土地条件指標ツール(4/4)

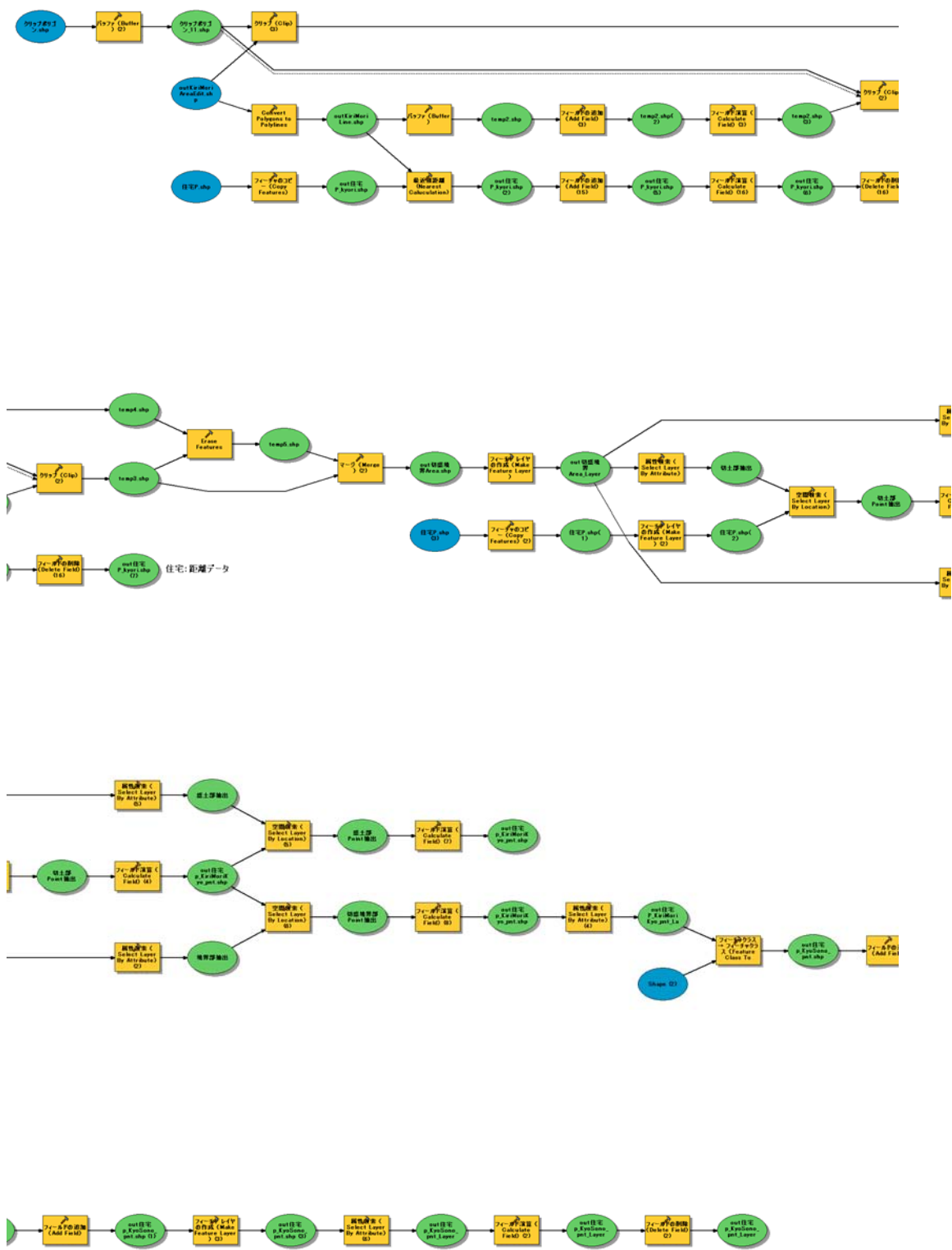


図 29 地形改変地土地条件評価システム(つづき)

② 切盛境界ツール

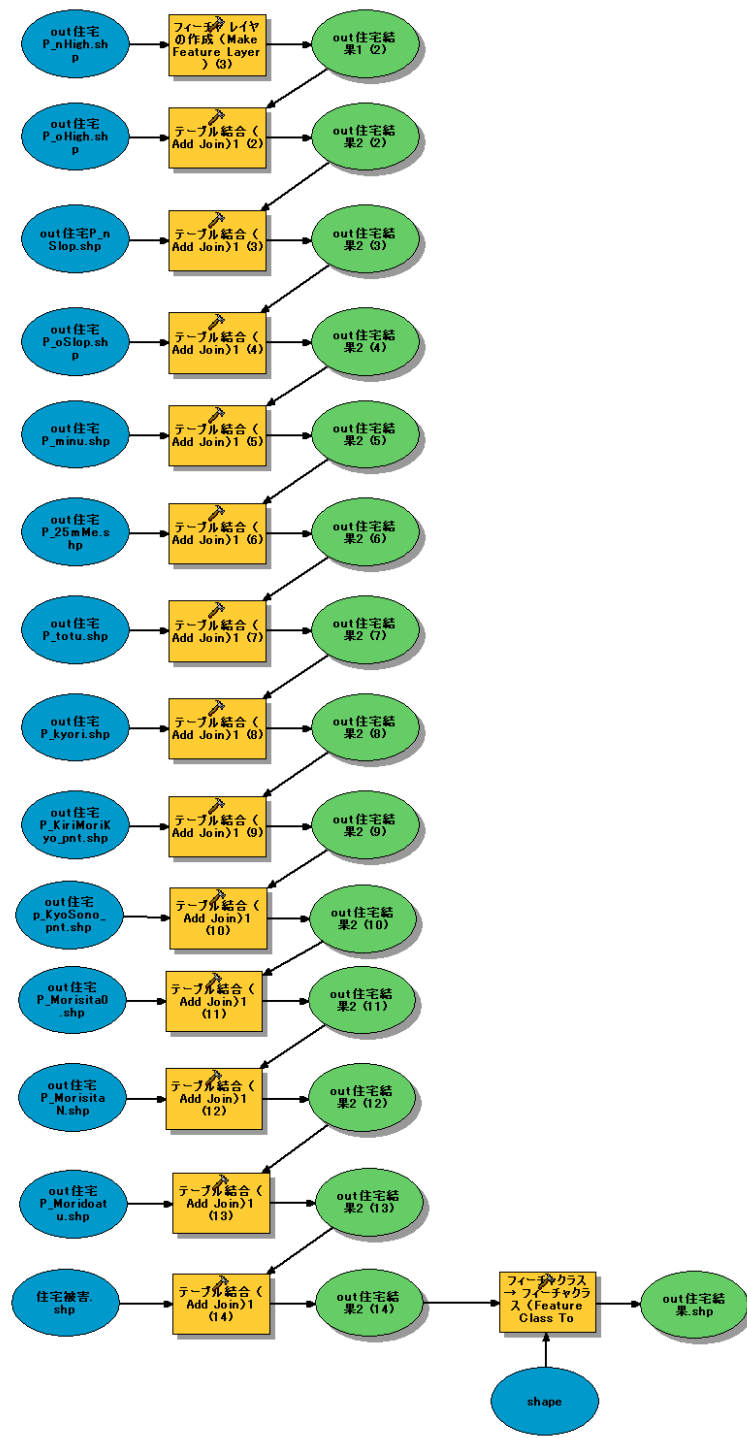
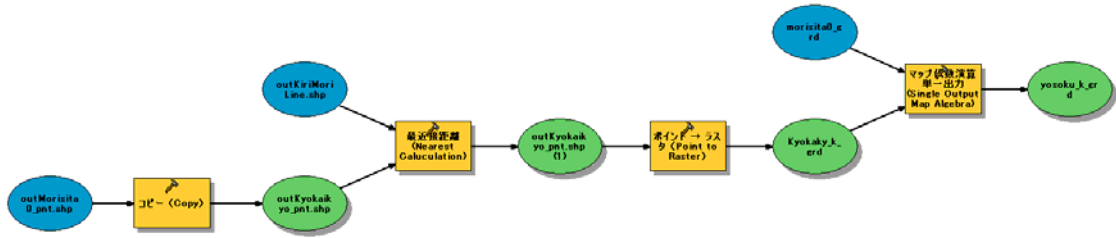
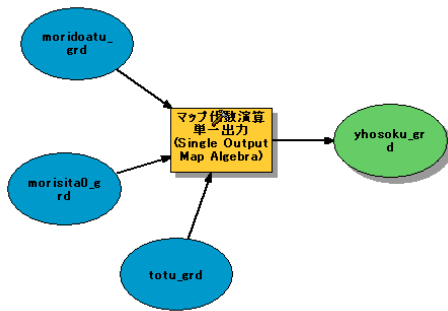


図 29 地形改変地土地条件評価システム(つづき)

③ テーブル結合ツール



距離版(「境界距離」を予測モデルに含む場合)

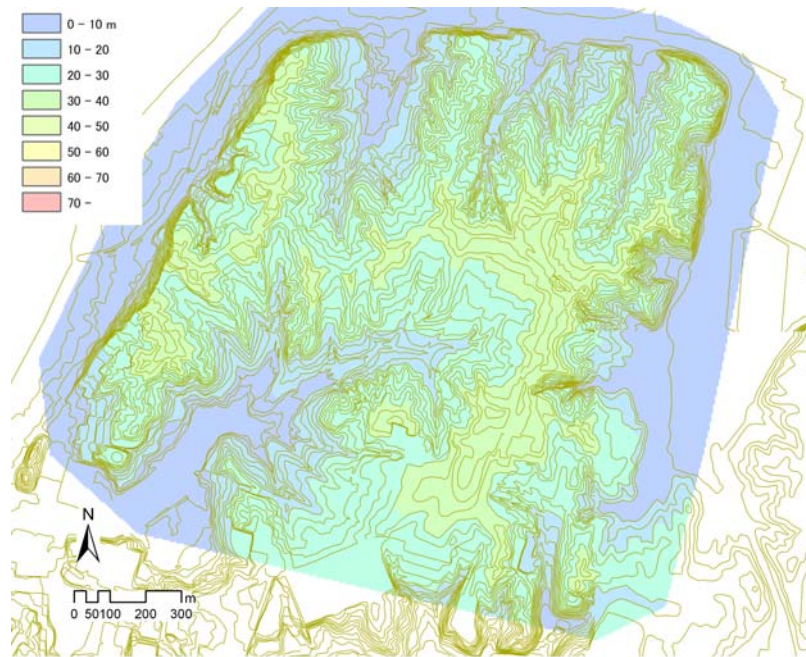


演算のみ版(「境界距離」を予測モデルに含まない場合)

図 29 地形改変地土地条件評価システム(つづき)

④ 予測マップツール

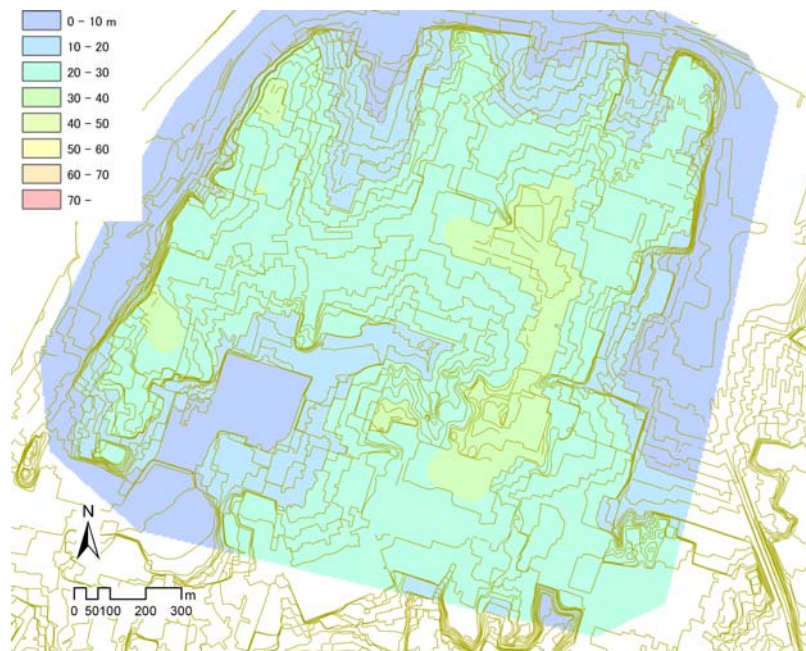
注: 予測モデルに使用するパラメータ(変数, グリッド shp)によって異なる



1956 年

1/3,000 釧路市都市計画図, 等高線間隔 2m による。

ただし右下部は 1957 年 1/10,000, 等高線間隔 5m。



2000 年

釧路市都市計画図 DM データ, 等高線間隔 2m による。

図 30 地形改変前後の地形(釧路市緑ヶ岡地区)



図 31 建物(住家)被害分布(釧路)
 釧路市資料にもとづきプロット, 灰色太線は分析対象範囲を示す。

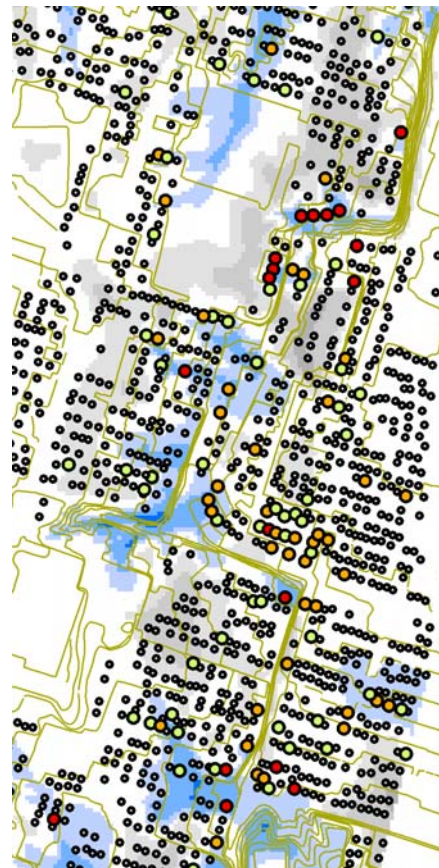


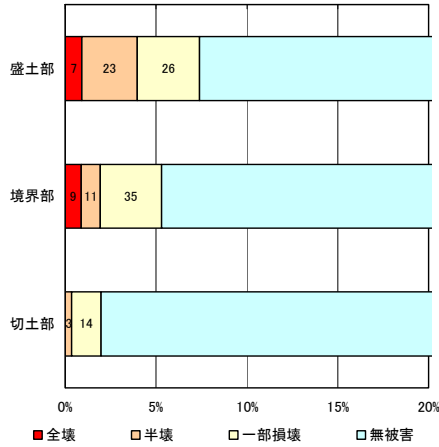
図 32 切盛推定厚と建物被害分布（釧路）

切盛推定厚＝新標高－旧標高

正：青が盛土，負：灰が切土

右：一部拡大図

表 1 切盛境界と建物被害(釧路)

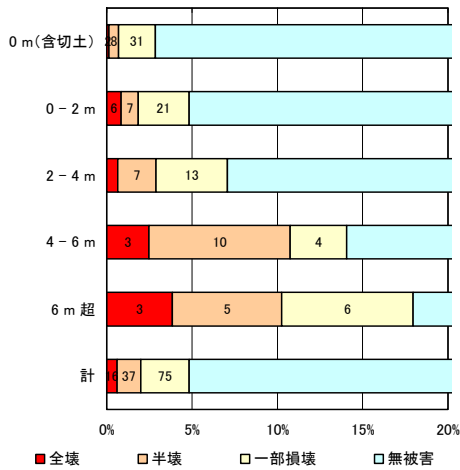


切・盛・境界	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損傷	無被害	
盛土部	7 0.9%	23 3.0%	26 3.4%	701 92.6%	757 100.0%
境界部	9 0.9%	11 1.1%	35 3.4%	981 94.7%	1036 100.0%
切土部	0 0.0%	3 0.3%	14 1.6%	844 98.0%	861 100.0%
計	16 0.6%	37 1.4%	75 2.8%	2526 95.2%	2654 100.0%

図 33 切盛境界と建物被害(釧路)

境界部:境界推定線から10m以内

表 2 盛土厚と建物被害(釧路)



盛土厚	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損傷	無被害	
0 m (切土部を含む)	2 0.1%	8 0.6%	31 2.2%	1398 97.2%	1439 100.0%
0 - 2 m	6 0.9%	7 1.0%	21 3.0%	671 95.2%	705 100.0%
2 - 4 m	2 0.6%	7 2.3%	13 4.2%	289 92.9%	311 100.0%
4 - 6 m	3 2.5%	10 8.3%	4 3.3%	104 86.0%	121 100.0%
6 m 超	3 3.8%	5 6.4%	6 7.7%	64 82.1%	78 100.0%
計	16 0.6%	37 1.4%	75 2.8%	2526 95.2%	2654 100.0%

図 34 盛土厚と建物被害(釧路)

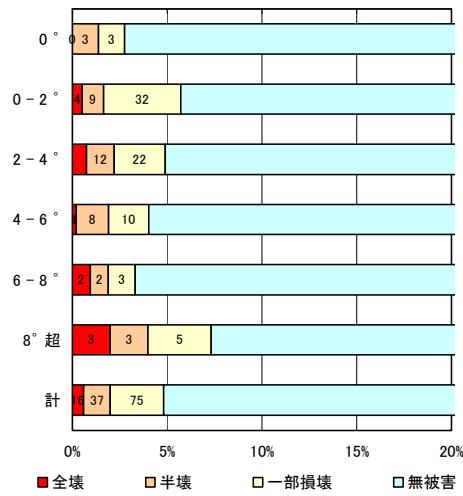


表 3 現傾斜と建物被害(釧路)

現傾斜	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損壊	無被害	
0°	0 0.0%	3 1.4%	3 1.4%	211 97.2%	217 100.0%
0-2°	4 0.5%	9 1.1%	32 4.1%	743 94.3%	788 100.0%
2-4°	6 0.7%	12 1.5%	22 2.7%	778 95.1%	818 100.0%
4-6°	1 0.2%	8 1.7%	10 2.1%	451 96.0%	470 100.0%
6-8°	2 0.9%	2 0.9%	3 1.4%	204 96.7%	211 100.0%
8°超	3 2.0%	3 2.0%	5 3.3%	139 92.7%	150 100.0%
計	16 0.6%	37 1.4%	75 2.8%	2526 95.2%	2654 100.0%

図 35 現傾斜と建物被害(釧路)

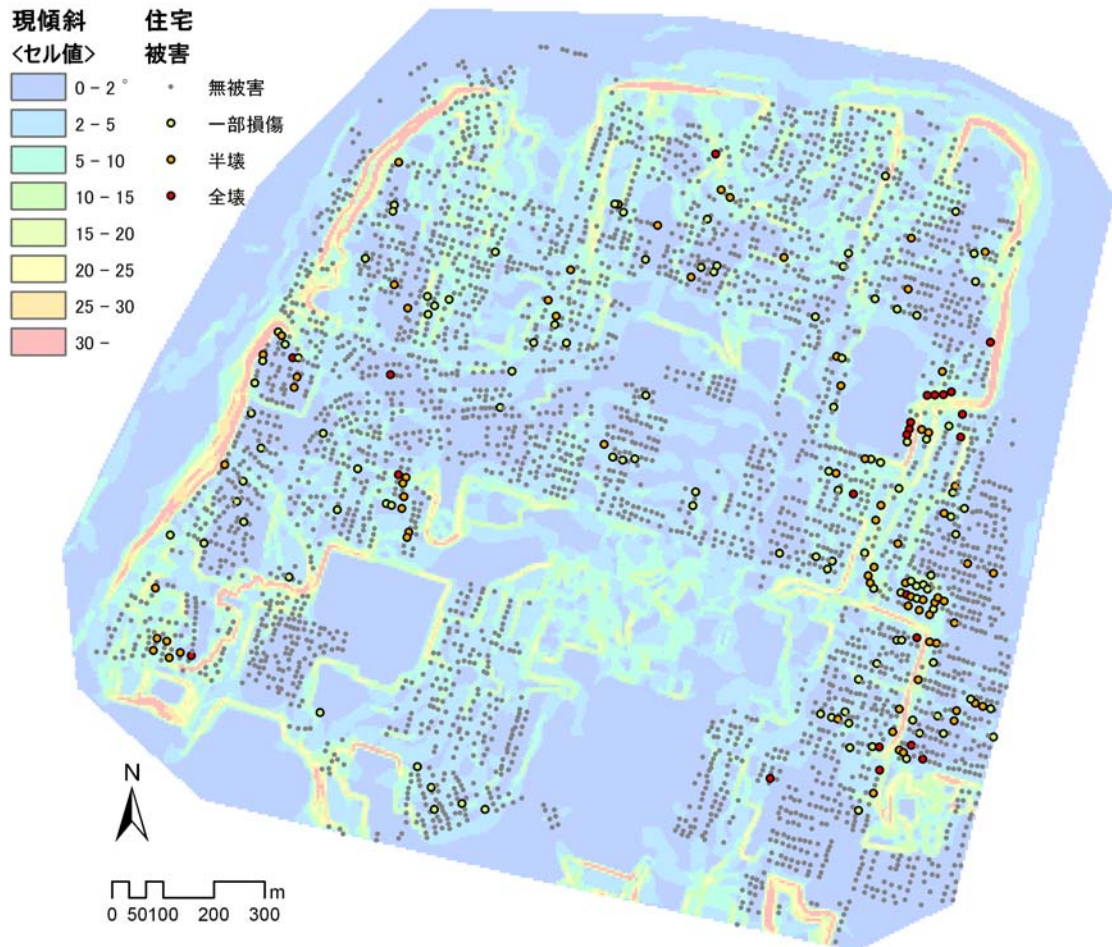


図 36 現傾斜と建物被害分布(釧路)

表 4 盛土下傾斜と建物被害(釧路)

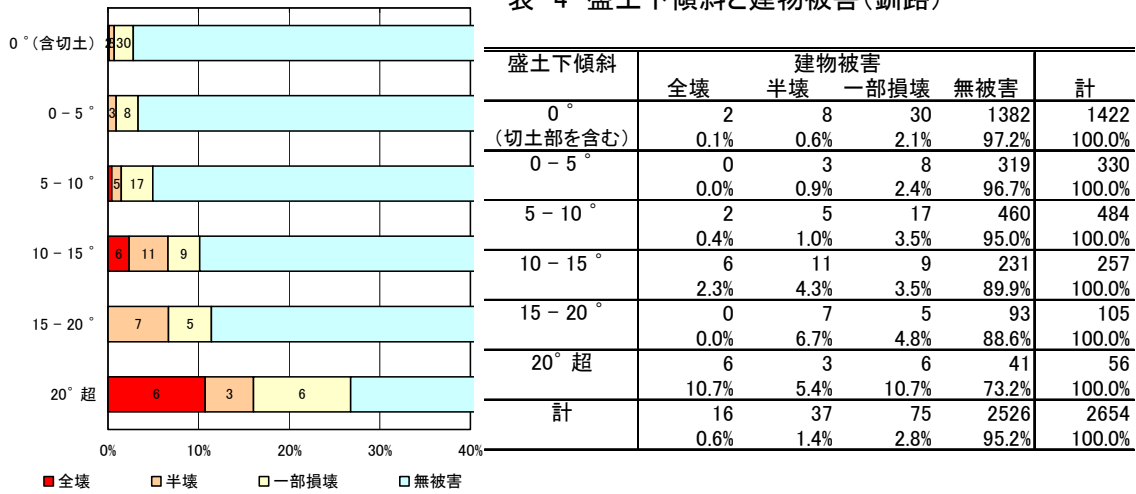


図 37 盛土下傾斜と建物被害(釧路)

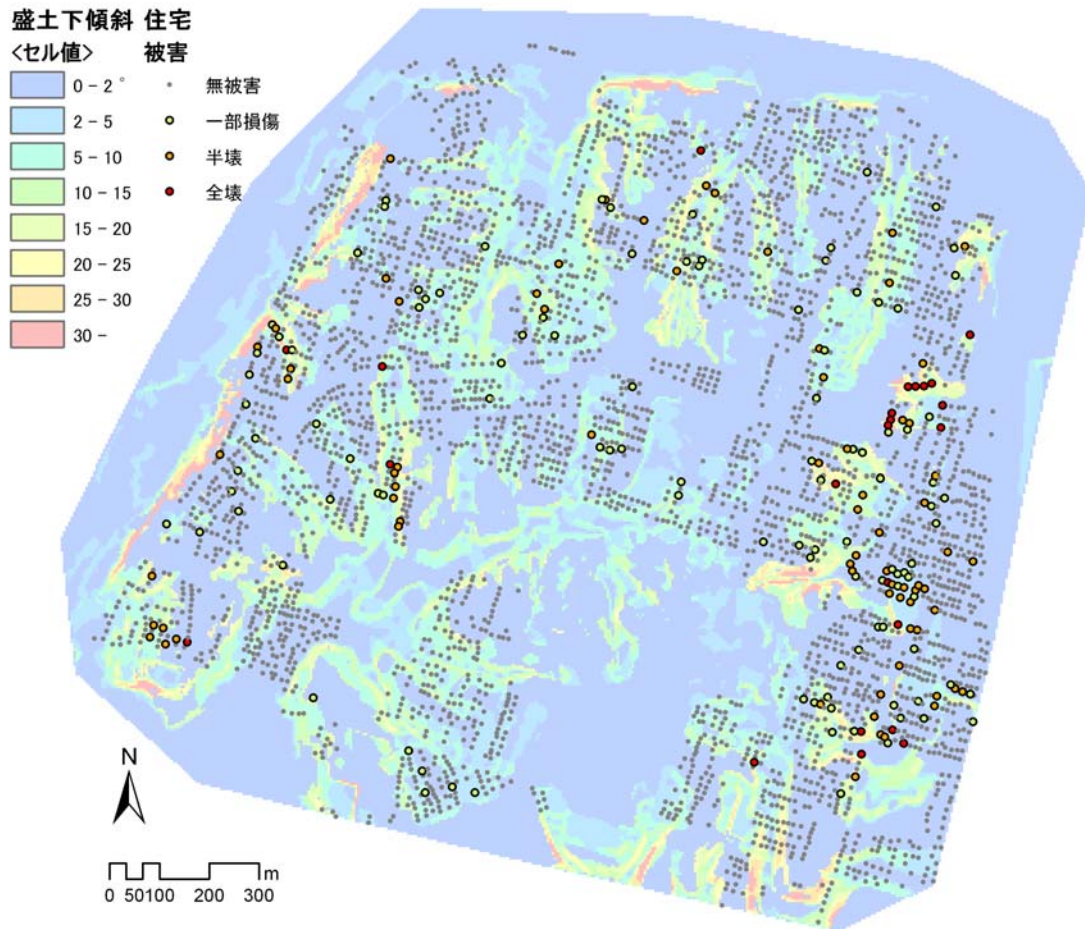


図 38 盛土下の旧地形傾斜(1956年)と建物被害分布(釧路)

切土部には0を与えた

表 5 凸指標と建物被害(釧路)

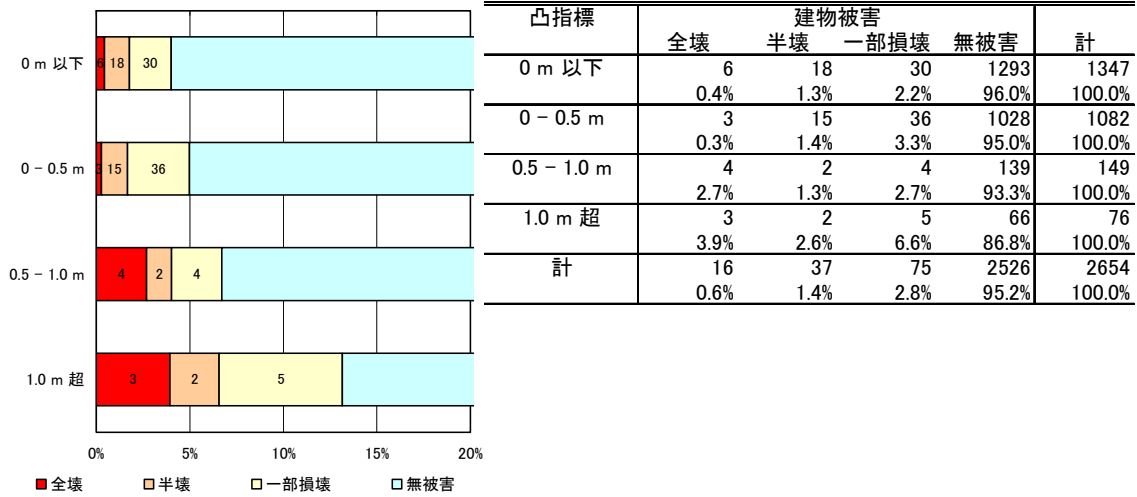


図 39 凸指標と建物被害(釧路)

凸指標 = 当該メッシュ標高 - 半径 25m 平均標高

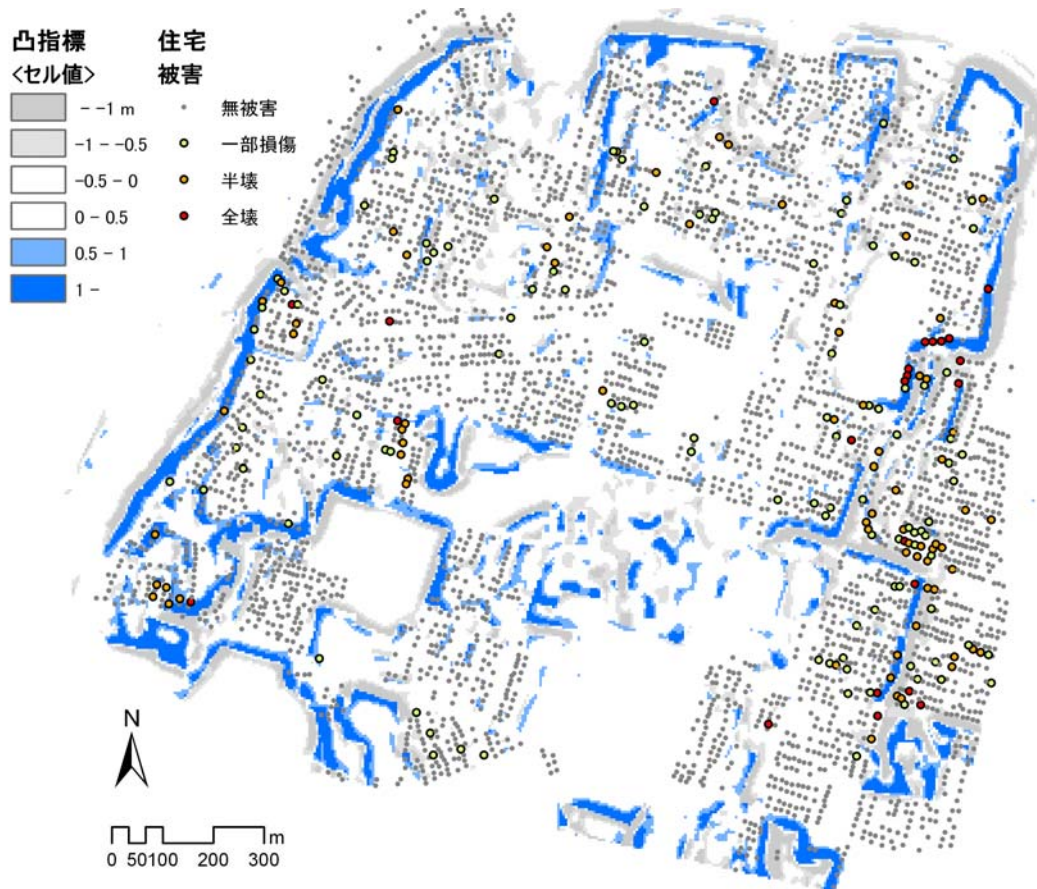


図 40 凸指標と建物被害分布(釧路)

表 6 ロジスティック回帰分析結果 1 (釧路)

	回帰係数B	有意確率	優比Exp(B)	自由度
盛土厚	0.246	0.000	1.279	1
盛土下傾斜	0.116	0.000	1.123	1
凸指標	0.624	0.020	1.867	1
定数	-5.300	0.000	0.005	1

(5 説明変数をステップワイズ投入して 3 変数選択)

表 7 ロジスティック回帰分析結果 2 (釧路)

	予測値		計	正分類率 %	
	無被害+ 一部損壊	全壊+ 半壊			
観測値	無被害+ 一部損壊	2020	581	2601	77.7
	全壊+ 半壊	12	41	53	77.4
全体				77.7	

分割値は .02 (2%)

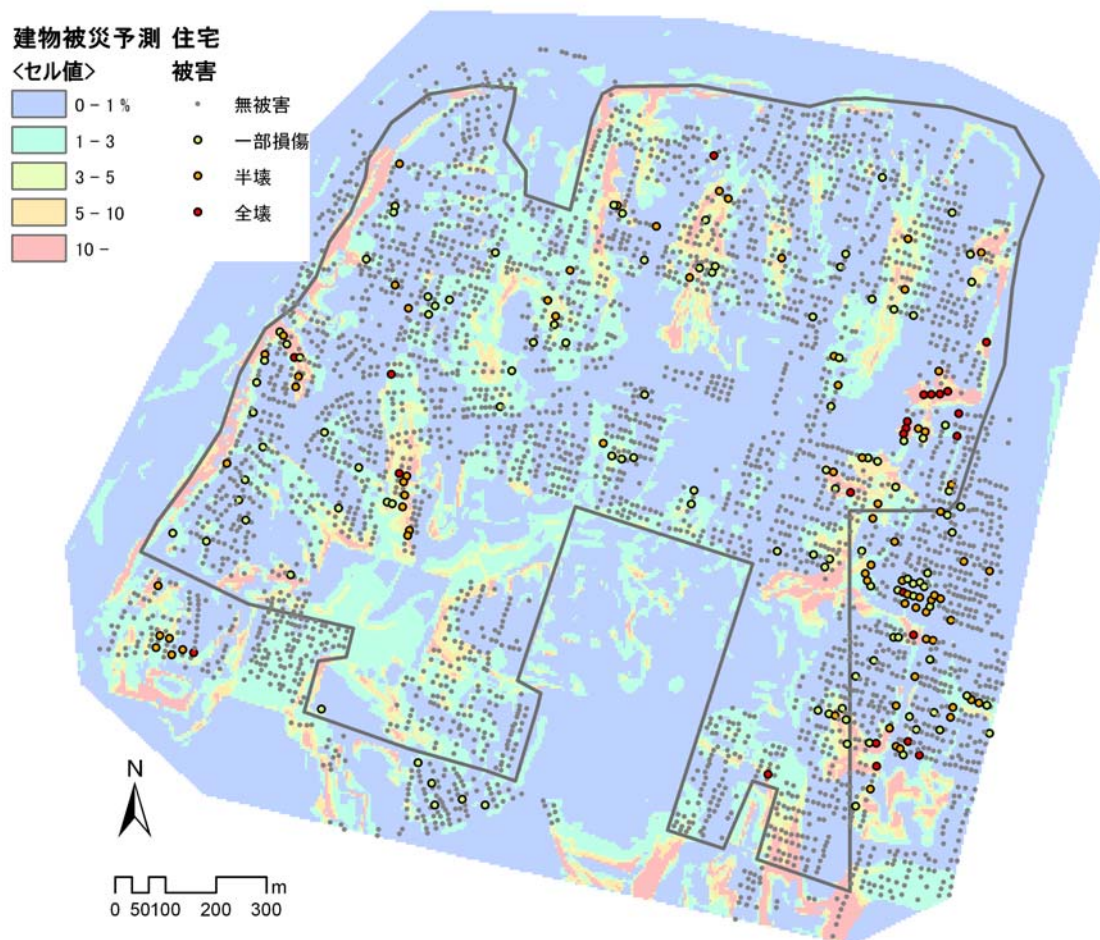


図 41 建物被災予測と建物被害(釧路)
 ロジスティック回帰モデルによる予測値と実際の建物被害
 灰色太線は分析対象範囲を示す。

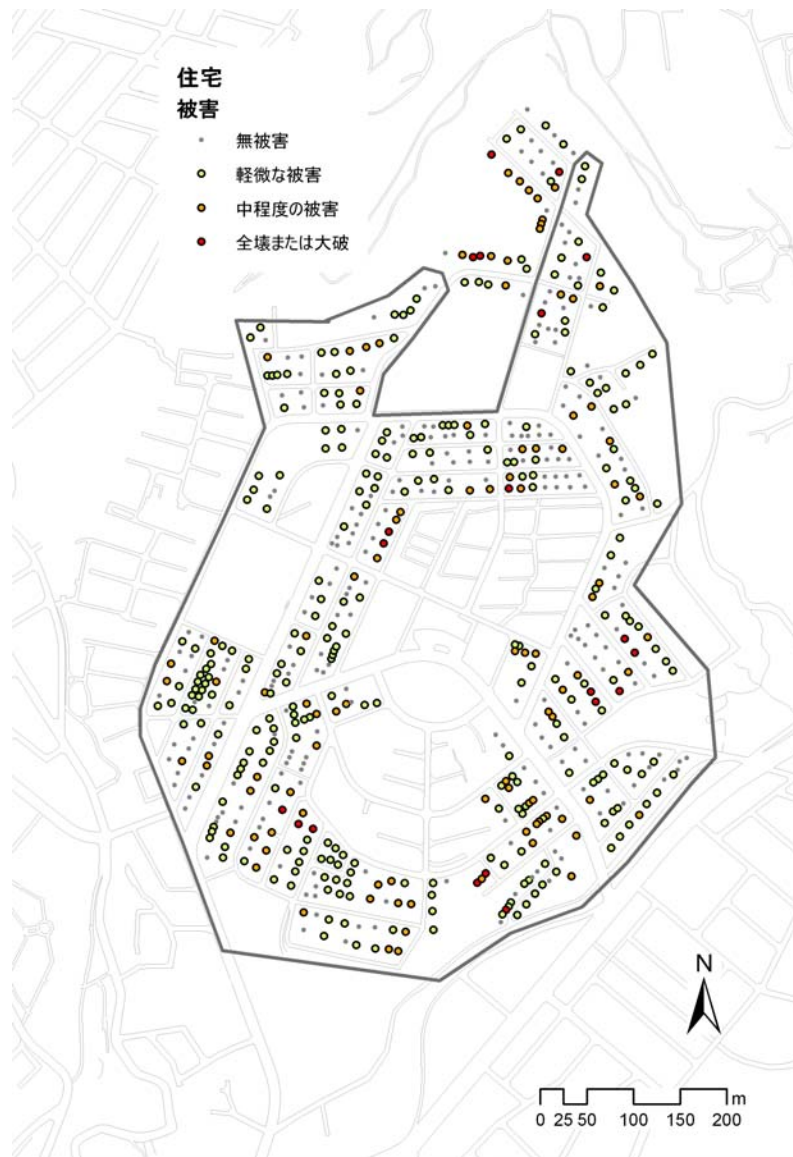
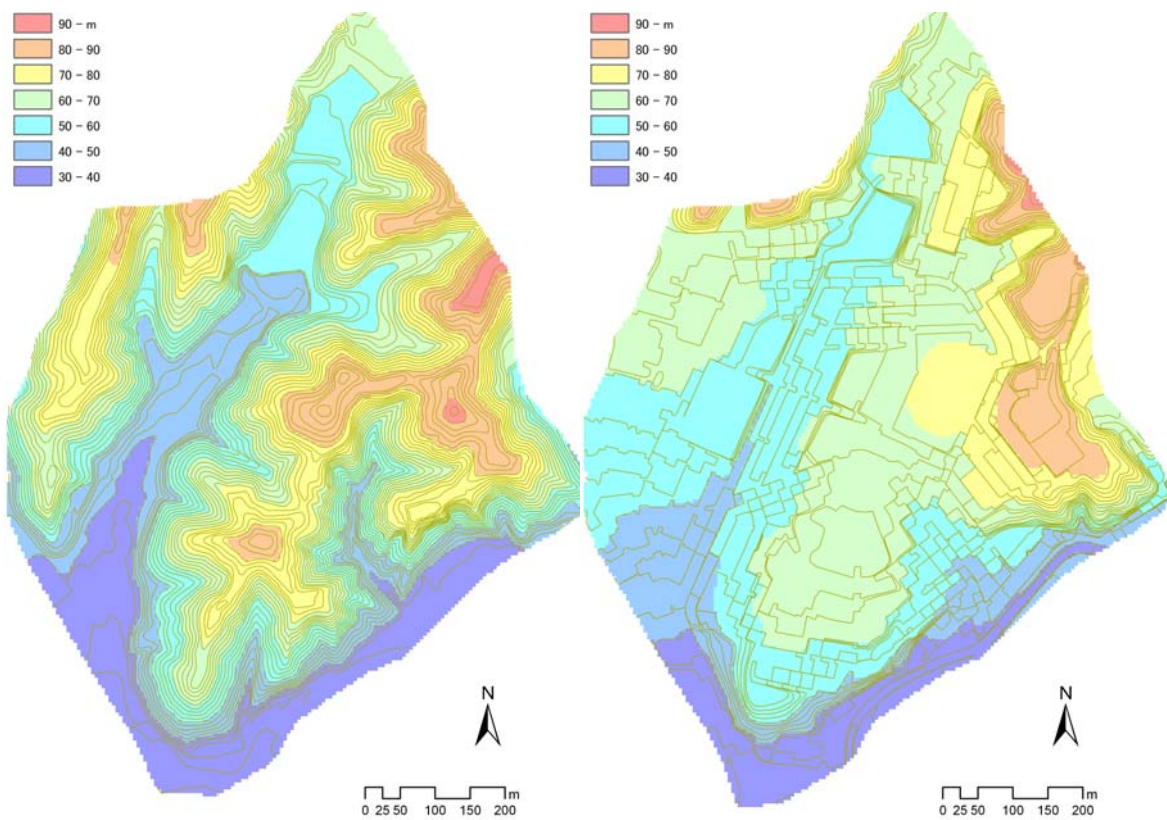


図 42 建物被害分布(神戸)
 1995年3月, 村山, 増田, 福井, 川口の現地調査による。
 大規模な集合住宅を除く。
 灰色太線は分析対象範囲を示す。



1947年 空中写真より図化

2000年 神戸市 DM データより

図 43 地形改変前後の地形(神戸)

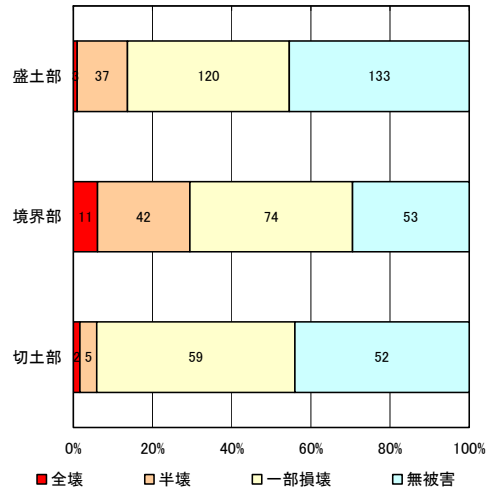


図 44 切盛境界と建物被害(神戸)
境界部:境界推定線から10m以内。

表 8 切盛境界と建物被害(神戸)

切・盛・境界	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損傷	無被害	
盛土部	3 1.0%	37 12.6%	120 41.0%	133 45.4%	293 100.0%
境界部	11 6.1%	42 23.3%	74 41.1%	53 29.4%	180 100.0%
切土部	2 1.7%	5 4.2%	59 50.0%	52 44.1%	118 100.0%
計	16 2.7%	84 14.2%	253 42.8%	238 40.3%	591 100.0%

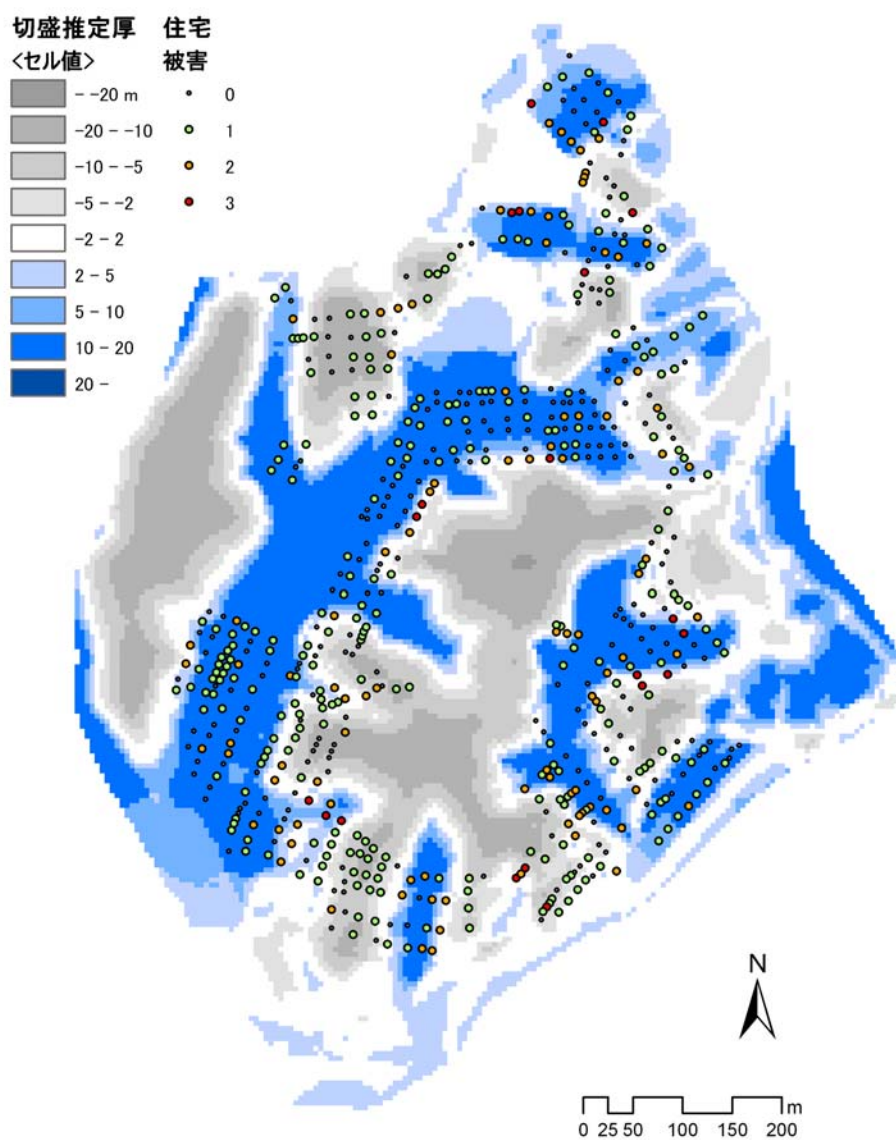


図 45 切盛推定厚と建物被害分布(神戸)

切盛推定厚=新標高-旧標高 正:青が盛土, 負:灰が切土

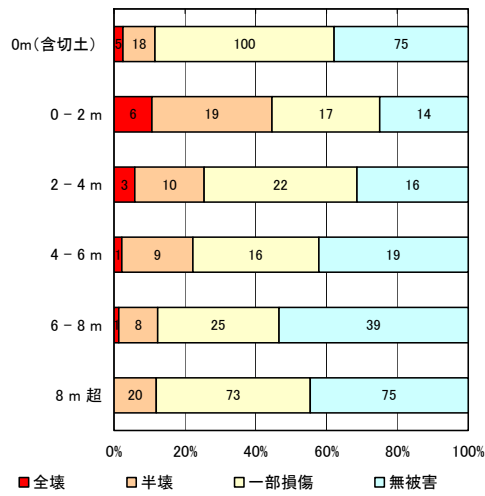


図 46 盛土厚と建物被害(神戸)

表 9 盛土厚と建物被害(神戸)

盛土厚	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損傷	無被害	
0 m (切土部を含む)	5 2.5%	18 9.1%	100 50.5%	75 37.9%	198 100.0%
0 - 2 m	6 10.7%	19 33.9%	17 30.4%	14 25.0%	56 100.0%
2 - 4 m	3 5.9%	10 19.6%	22 43.1%	16 31.4%	51 100.0%
4 - 6 m	1 2.2%	9 20.0%	16 35.6%	19 42.2%	45 100.0%
6 - 8 m	1 1.4%	8 11.0%	25 34.2%	39 53.4%	73 100.0%
8 m 超	0 0.0%	20 11.9%	73 43.5%	75 44.6%	168 100.0%
計	16 2.7%	84 14.2%	253 42.8%	238 40.3%	591 100.0%

表 10 現傾斜と建物被害(神戸)

現傾斜	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損壊	無被害	
0°	0 0.0%	1 14.3%	2 28.6%	4 57.1%	7 100.0%
0 - 2°	3 7.3%	1 2.4%	19 46.3%	18 43.9%	41 100.0%
2 - 4°	4 3.5%	21 18.6%	52 46.0%	36 31.9%	113 100.0%
4 - 6°	2 1.1%	27 14.8%	74 40.7%	79 43.4%	182 100.0%
6 - 8°	2 1.7%	16 13.7%	53 45.3%	46 39.3%	117 100.0%
8° 超	5 3.8%	18 13.7%	53 40.5%	55 42.0%	131 100.0%
計	16 2.7%	84 14.2%	253 42.8%	238 40.3%	591 100.0%

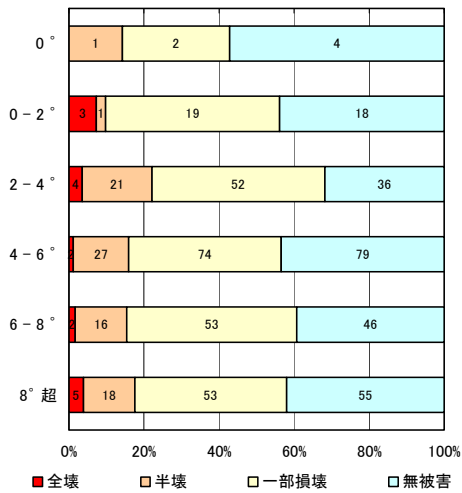


図 47 現傾斜と建物被害(神戸)

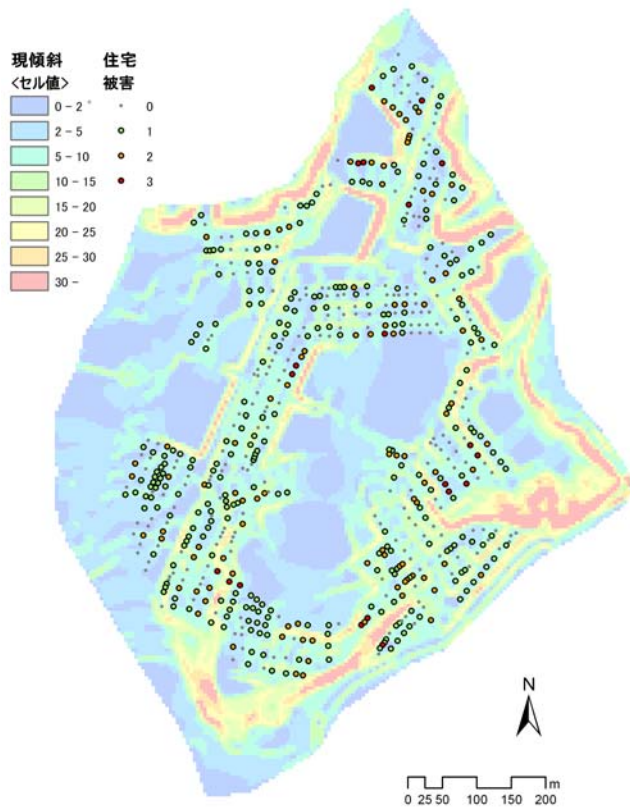


図 48 現傾斜と建物被害分布(神戸)

表 11 盛土下傾斜と建物被害(神戸)

盛土下傾斜	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損壊	無被害	
0° (切土部を含む)	5 2.4%	19 9.2%	101 48.8%	82 39.6%	207 100.0%
0 - 5°	0 0.0%	5 7.4%	29 42.6%	34 50.0%	68 100.0%
5 - 10°	0 0.0%	7 12.7%	28 50.9%	20 36.4%	55 100.0%
10 - 15°	0 0.0%	7 15.9%	17 38.6%	20 45.5%	44 100.0%
15 - 20°	3 4.3%	15 21.7%	27 39.1%	24 34.8%	69 100.0%
20° 超	8 5.4%	31 20.9%	51 34.5%	58 39.2%	148 100.0%
計	16 2.7%	84 14.2%	253 42.8%	238 40.3%	591 100.0%

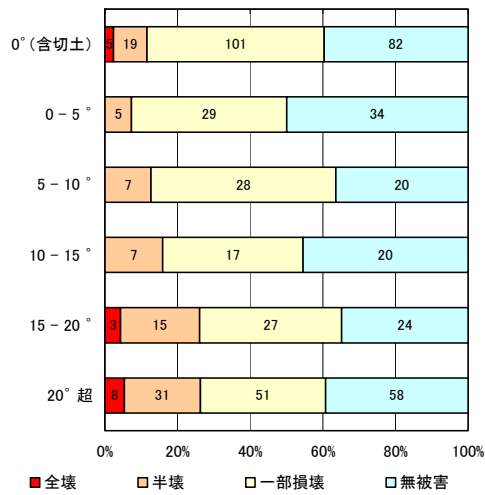


図 49 盛土下傾斜と建物被害
(神戸)

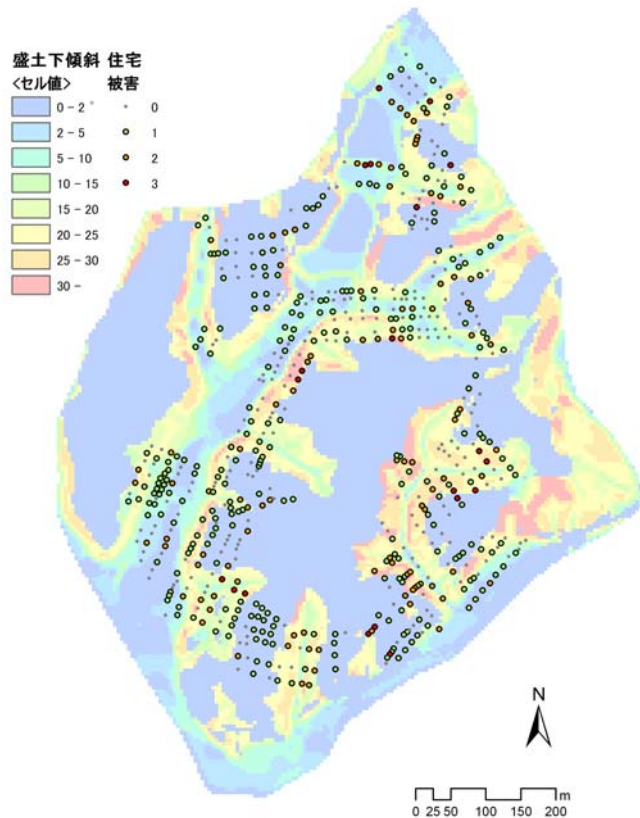


図 50 盛土下傾斜と建物被害分布(神戸)
切土部には 0 を与えた

表 12 凸指標と建物被害(神戸)

凸指標	建物被害				計
	全壊	半壊	一部損壊	無被害	
0 m 以下	10 3.7%	39 14.4%	110 40.7%	110 40.7%	270 100.0%
0 - 0.5 m	5 2.5%	28 13.8%	84 41.4%	84 41.4%	203 100.0%
0.5 - 1.0 m	1 1.1%	13 14.8%	45 51.1%	45 51.1%	88 100.0%
1.0 m 超	0 0.0%	4 13.3%	14 46.7%	14 46.7%	30 100.0%
計	16 2.7%	84 14.2%	253 42.8%	253 42.8%	591 100.0%

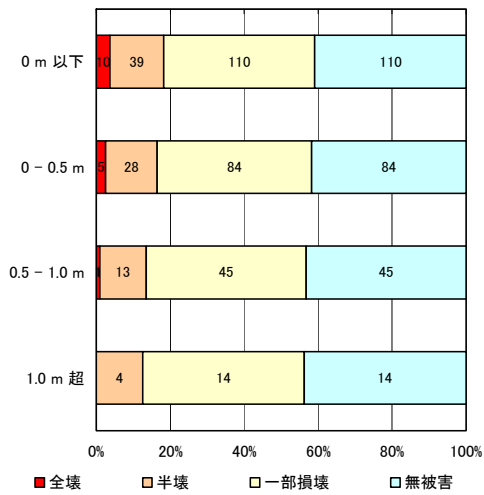


図 51 凸指標と建物被害(神戸)

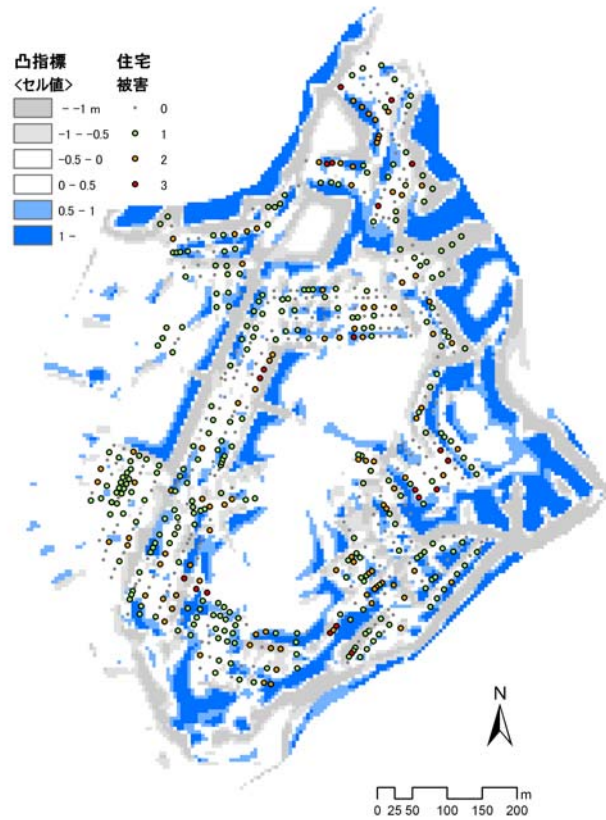


図 52 凸指標と建物被害分布(神戸)

凸指標 = 当該メッシュ標高 - 半径 25m 平均標高

表 13 ロジスティック回帰分析結果 1 (神戸)

	回帰係数B	有意確率	優比Exp(B)	自由度
盛土下傾斜	0.032	0.002	1.032	1
境界距離	-0.045	0.000	0.956	1
定数	-1.245	0.000	0.288	1

(5 説明変数をステップワイズ投入して 2 変数選択)

表 14 ロジスティック回帰分析結果 2 (神戸)

	予測値		計	正分類率 %
	無被害+ 軽微な被害	全壊または大破 +中程度の損傷		
無被害+ 軽微な被害	349	142	491	71.1
全壊または大破 +中程度の損傷	42	58	100	58.0
全体				68.9

分割値は .20 (20%)

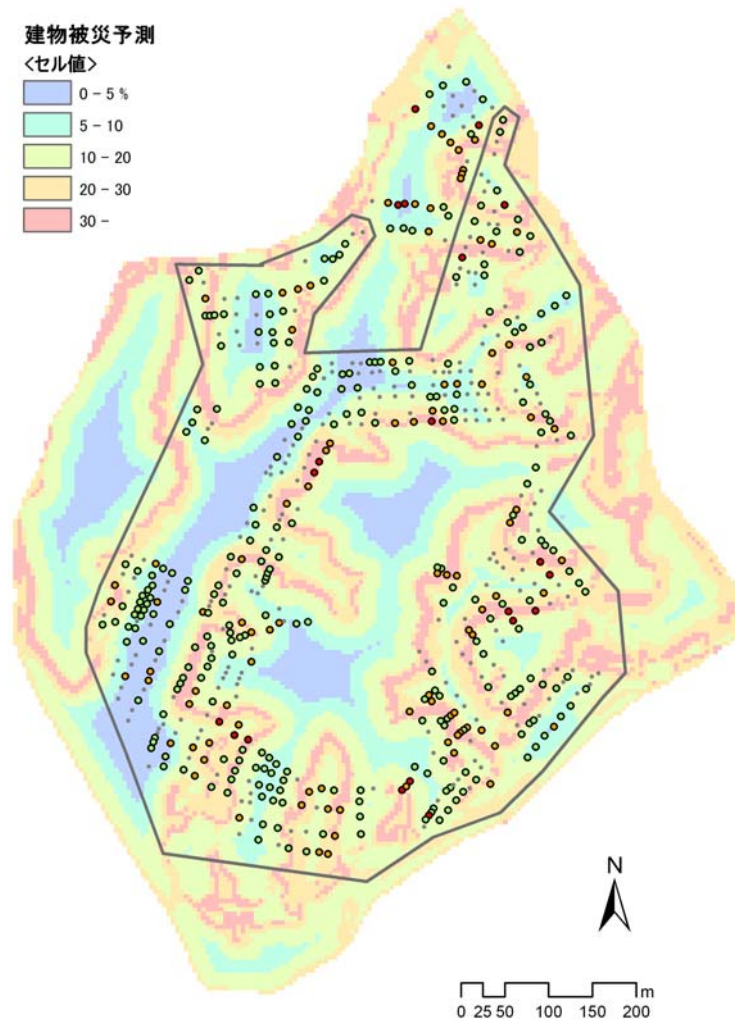
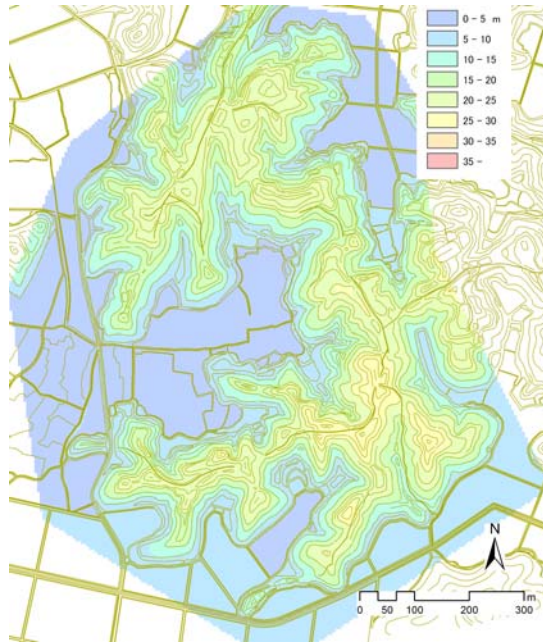


図 53 建物被災予測と建物被害(神戸)
 ロジスティック回帰モデルによる予測値と実際の建物被害
 灰色太線は分析対象範囲を示す。

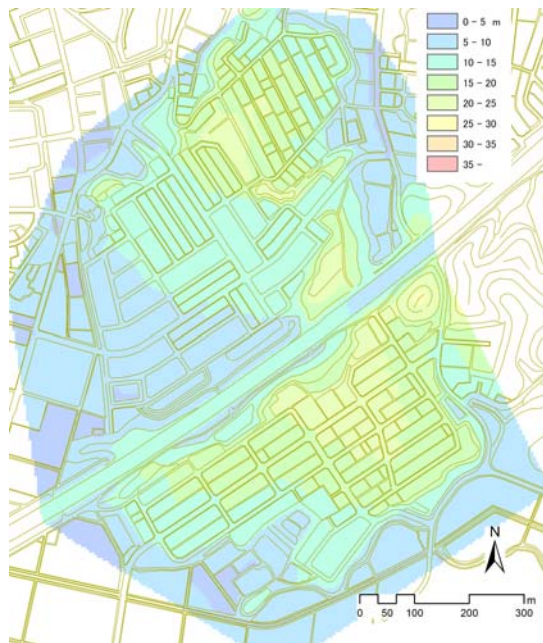
表 15 地形とその改変の比較

事例地区	盛土厚 (m)		盛下傾斜 (°)		凸指標(m)	
	最大値	平均値	最大値	平均値	最大値	平均値
釧路	14.6	0.9	47.7	3.6	6.8	0.0
神戸	20.0	3.0	48.0	8.8	6.2	0.0
柏崎	13.6	1.6	49.6	4.5	4.6	0.0
東京	16.5	1.7	43.5	5.7	18.8	-0.1

いずれも解析範囲全体における数値。
 盛土厚と盛下傾斜の切土部は0であるが、平均値はそれらを含めて求めた。



1961 年



2007 年

図 54 地形改変前後の地形(柏崎)
 国土地理院提供のブレイクラインデータにより DEM 生成

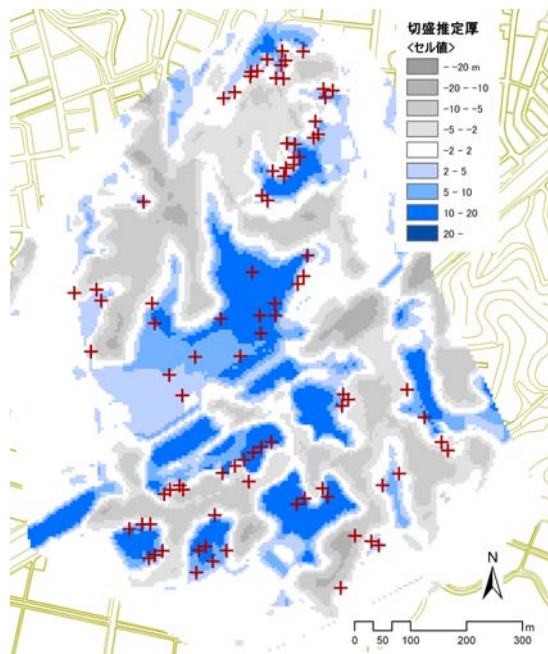


図 55 切盛推定厚と地盤被害分布(柏崎)

切盛推定厚=新標高-旧標高

正:青が盛土, 負:灰が切土

+ :道路・擁壁の亀裂, 擁壁大修理等

2007年7月, 2008年8月 村山, 川村, 阿部, 斎藤の現地調査による。

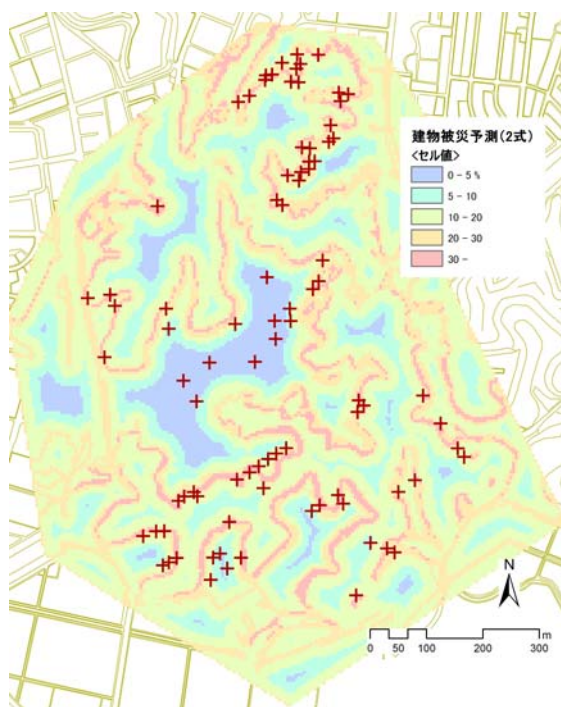
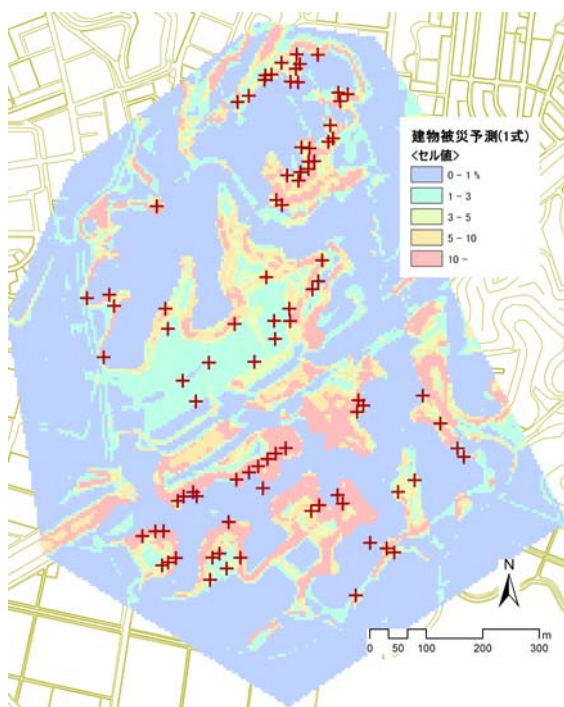


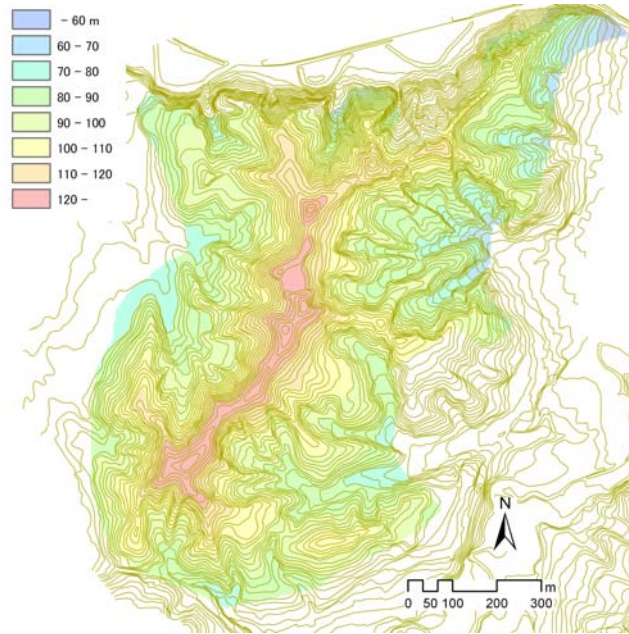
図 56 回帰式による建物被災予測:土地条件評価の試み(柏崎)

左:釧路の回帰式に基づく

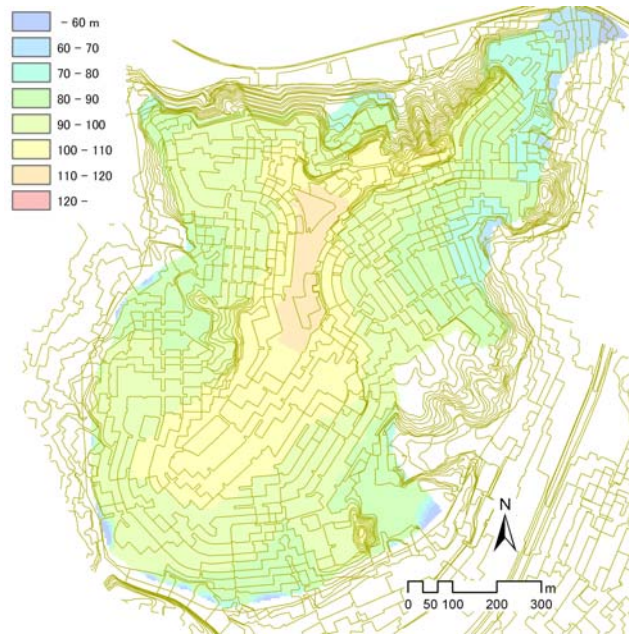
$$\text{EXP}(0.246 \times \text{盛土厚} + 0.116 \times \text{盛土下傾斜} + 0.624 \times \text{凸指標} - 5.3) / (1 + \text{EXP}(0.246 \times \text{盛土厚} + 0.116 \times \text{盛土下傾斜} + 0.624 \times \text{凸指標} - 5.3))$$

右:神戸の回帰式に基づく

$$\text{EXP}(0.032 \times \text{盛土下傾斜} - 0.045 \times \text{境界距離} - 1.245) / (1 + \text{EXP}(0.032 \times \text{盛土下傾斜} - 0.045 \times \text{境界距離} - 1.245))$$



1947年 空中写真より図化



2000年 東京都DMデータより

図 57 地形改変前後の地形(東京)

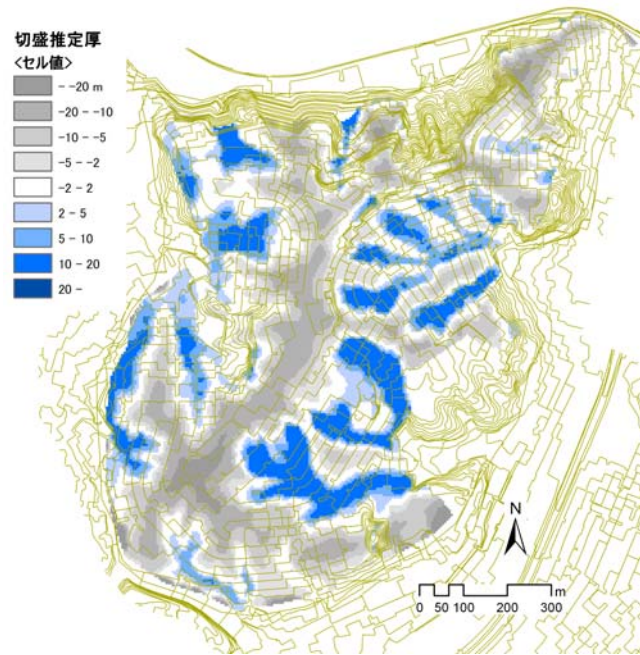


図 58 切盛推定厚(東京)

切盛推定厚 = 新標高 - 旧標高, 正: 青が盛土, 負: 灰が切土

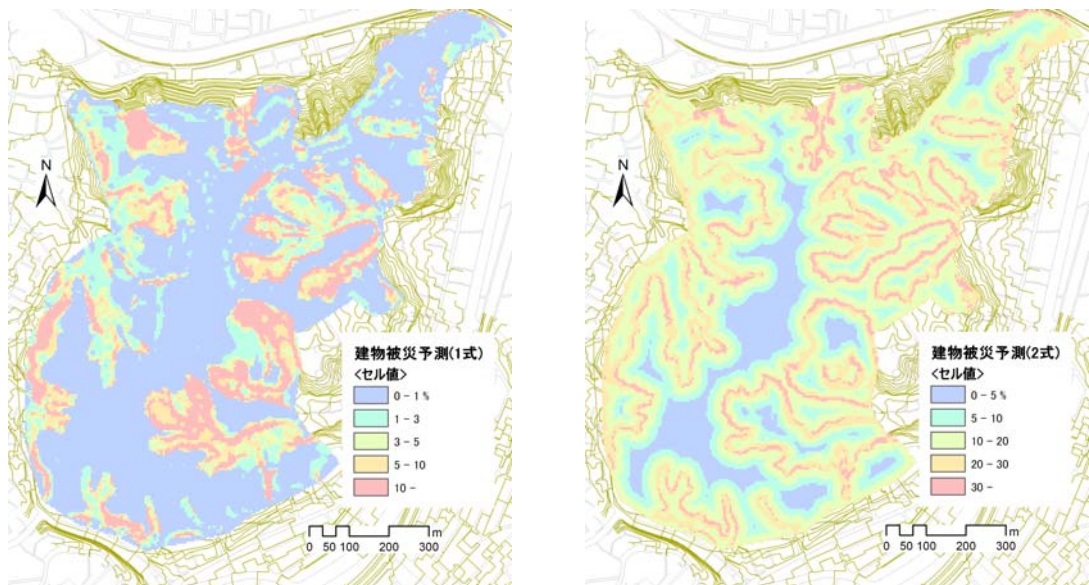


図 59 回帰式による建物被災予測: 土地条件評価の試み(東京)

左: 釧路の回帰式に基づく

$$\text{EXP}(0.246 * \text{盛土厚} + 0.116 * \text{盛土下傾斜} + 0.624 * \text{凸指標} - 5.3) / (1 + \text{EXP}(0.246 * \text{盛土厚} + 0.116 * \text{盛土下傾斜} + 0.624 * \text{凸指標} - 5.3))$$

右: 神戸の回帰式に基づく

$$\text{EXP}(0.032 * \text{盛土下傾斜} - 0.045 * \text{境界距離} - 1.245) / (1 + \text{EXP}(0.032 * \text{盛土下傾斜} - 0.045 * \text{境界距離} - 1.245))$$

助成研究者紹介

むらやま よしゆき
村山 良之

現職：山形大学地域教育文化学部准教授（博士（理学））

主な著書・論文：

デジタル写真測量と GIS を用いた地形改変の測定と土地条件評価に関する研究（文科省科学研究費研究成果報告書，91p.，2006）

「総合的な宅地防災対策」に期待すること（日本地理学会発表要旨集，69，p.152，2006）

2003年7月26日宮城県北部地震における建物被害調査（日本建築学会技術報告集，22，pp.595-600，2005，共著）

ニュージーランドの防災型土地利用規制に関する考察－地方分権と資源管理型環境政策への転換との関わりを踏まえて－（都市計画論文集，39，pp.601-606，2004，共著）

くまき ようた
熊木 洋太

現職：専修大学文学部教授（理学修士，技術士（応用理学））

主な著書・論文：

地形分類図の読み方・作り方 改定増補版（古今書院，2002，共著）

斜面地質学（日本応用地質学会，1999，共著）

パキスタン北部地震による地表断層変位の“リモートセンシング”（E-Journal GEO，2，pp.86-94，2007，共著）

2003年7月26日宮城県北部地震M6.4が提起した地震動予測地図と活断層評価の課題（日本地震工学会論文集，4(5)，pp.1-4，2005，共著）

Study on evaluation of ground conditions of transformed land using GIS

MURAYAMA, Yoshiyuki ¹ KUMAKI, Yohta ²

¹ Yamagata University ² Senshu University

The damage on the artificially transformed hills, for suburban residential estates, has been increasingly observed in earthquake disasters in recent years in Japan. Most of such damage is caused by ground failure rather than by strong ground shaking itself.

Five indices were selected as ground conditions of transformed land as the results of the former studies by the authors: Cut/Fill/Boundary or Distance from the Cut-Fill Boundary, Thickness of Fills, Present Slope, Original Slope under the fill, and Convexity (difference in height between the center point of an area 25m in radius and the average height).

The ground condition evaluating system for transformed land (GEST) was built in GIS based on the former studies by the authors. The system was used for re-analyzing the sample area of Kushiro and Kobe, affected by big earthquake in 1993 and 1995 respectively. The logistic regression models accounting for housing damage by some ground conditions were extracted by the analysis. The models then were applied to other areas of Kashiwazaki and Tokyo on a trial basis in order to estimate probabilities of housing damage using the GEST built in GIS.

Other explaining variables, such as geological condition, architectural structures and so on, would enable more precise prediction by the model of the housing damage on transformed land.

Keywords: *Earthquake disaster, Transformed land, Ground condition, GIS, Logistic regression*

研 究 成 果 の 要 約

助成番号	助 成 研 究 名	研 究 者 ・ 所 属
第2007-5号	GIS を用いた地形改変地の震災土地条件評価	村山良之・山形大学
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>わが国では、大都市圏郊外の住宅団地が丘陵地等の地形改変を伴って拡大し、近年では地震災害のたびにこれらが特徴的な被害を被っている。すなわち、切土部では被害がほとんど無いのに対して、盛土部や切盛境界部で主として地盤破壊を伴う建物被害が多発する。本研究では、GISを用いてこれを定量的に検討して地形改変地の土地条件評価を目指し、ひいては地震ハザードマップの作成方法について検討するものである。</p> <p>地形改変前後の大縮尺地形図の等高線からDEMを生成して、またとくに地形改変前の大縮尺地形図が入手できない場合においては空中写真を利用してDEMを生成して、これをGISに取り込んで統計的分析にいたる一連のプロセスについて、これまでの筆者の検討によってその実効性を確認したところであるが、今回は、それらのうちGIS関連の作業の大部分を自動化した。そのなかで、土地条件指標群の生成手法を再検討し、とくにGISの専門技術者の協力を得たことで、土地条件指標の一部について改善できた。さらに、GISの外部で求めた建物被害判別（予測）回帰式を取り込むことで、その結果の地図化作業までを含む地形改変地土地条件評価システムを構築した。</p> <p>以上に沿って、釧路、神戸の2事例地区における戸建て住宅等の建物被害について、地形改変に関する土地条件指標群と建物被害との関連を、クロス集計とロジスティック回帰分析によって、（再）検討した。その結果、釧路の分析からは、盛土厚が厚いほど、盛土下の原地形の傾斜が大きいほど、そして凸指標が大きいほどつまり崖上等であるほど、全半壊といった激しい建物被害が発生しやすいこと、また神戸の分析では、中程度以上の激しい建物被害が、切盛境界推定線からの距離が近いほど、盛土下傾斜が大きいほど発生しやすいことを明らかにした。これらの観測値と回帰式による予測値との整合性をみると、おおむね各対象地区全体の被</p> </div> <div style="width: 48%;"> <p>災率を分割値とした場合、70%程度以上の的中率が得られた。</p> <p>建物の条件や地質条件等をまったく考慮しないで、地形改変および地形関連の指標のみでこれだけの判別が可能ということは、地形とその改変が地震に対する土地条件としていかに重要な指標であるかを（改めて）示したといえよう。</p> <p>ただし、上述のとおり建物被害と強く関連する土地条件指標（すなわち回帰モデル式）が釧路と神戸の2事例で異なっている。（改変前後の）地形の違いに加えて、地盤破壊の様式や地質さらには建物の堅牢度が関連していることが想定できるが、これらの回帰式の差異や共通性についての定量的説明は今後の課題である。</p> <p>さらに、2つの回帰式を用いて、柏崎と東京の事例地区で建物被災予測を試みた。それらの地形および改変の程度から類推すると、いずれの地区も釧路の回帰式に基づく予測確率分布の方がより適切と考えられる。柏崎の（建物被災ではなく）地盤被害分布との重ね合わせからも、釧路の回帰式による予測図の方が当てはまりが良いと判断できる。</p> <p>以上のとおり、地形改変地の地震ハザードマップの作成方法に関して一定程度の前進が得られた。今後は、地質条件や建物に関する独立変数を追加し、さらに地盤被害を従属変数として工夫するなどして、回帰式（被害予測モデル）の改善、ひいてはその統一または合理的使い分けができるよう努めたい。このことは、地形改変地の地震ハザードマップの作成方法をさらに改善することになると考える。</p> </div> </div>		