地震による地盤災害と土地条件との関連に関するGIS解析
GIS Analysis of the Relationship Between Earthquake Hazard and Land Condition

地理地殻活動研究センター　小荒井 衛・佐藤　浩・宇根　寛
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Mamoru KOARAI, Hiroshi P. SATO and Hiroshi UNE

要　　旨

2006年，土地条件図が国土地理院からベクトルデータとして刊行され，GIS を使って様々な国土情報と組み合わせて解析することが容易になった．本報告では，土地条件図の地形分類ポリゴンデータと実際の地震での建物被害の分布をGIS上で重ね合わせることにより，地形分類と地震被害との関連を解析した.対象としたのは，1854年の「安政東海地震」，1891年の「濃尾地震」，1944年の「東南海地震」である．

１．はじめに

土地条件図は，その土地の持つ自然的特性を表現した主題地図情報である．その中心となる情報は地形分類である．現在の地形を地形発達史の視点から分類することで，その土地の成り立ち，形成過程の違いによる自然的特性の地理的分布を表現しているものである．一方，災害現象は，土地の成り立ちの過程の一断面が人の営みと交わることにより発生すると捉えることが出来る．詳細なハザードマップの作成が災害軽減には必要であるが，その際には地形分類図を有効に活用することが望ましい．土地を地形発達史的な概念で捉えることにより，その土地の持つ災害特性を容易に理解することが出来るからである．

現在国土地理院では，土地条件図をハザードマップとして活用する方策の検討を進めているところである．その一環として，過去の災害履歴を過去の地形発達過程を表している土地条件図の地形分類情報と重ね合わせて，各地形単元の災害脆弱性について評価しようとしている．

本報告では，地震による地盤災害の事例として，東海地方での災害事例を取り上げる．東海地方を取り上げる理由は，土地条件図が比較的良く整備されていることと，プレートの沈み込みに伴う巨大地震が定期的に発生し過去の地震災害の情報が入手しやすいこと，発生が予測されている想定東海地震等災害ポテンシャルが高く土地条件図の情報を有効活用できる地域であること，などが上げられる．対象としたのは，1854年の「安政東海地震」，1891年の「濃尾地震」，1944年の「東南海地震」の３つである．

２．濃尾地震の建物被害分布と土地条件

２．１　方法

1891年，岐阜県西部で起きたM8.0の濃尾地震による住家被害率分布図を作成し，その地域の土地条件図と重ね合わせて，被害の大きい土地条件を解析した．被害分布の情報としては，村松（1983）を，土地条件図は「名古屋南部」「名古屋北部」「岐阜」「大垣」「津島」「桑名」の各図面を使用した．従って解析対象範囲は濃尾平野のほぼ全域である．

村松（1983）の住家被害率の等値線図のデータをArcMAPを用いてトレースした．等値線図については，必ずしも閉じた線とはなっていないため，必要に応じ各地域の被害状況から判断して等値線を閉じるように作成し,ポリゴンデータを形成するようにした．なお，村松（1983）では，濃尾地震の住家被害率は次のように計算している．

岐阜県：被害率＝{全壊＋0.5×半壊}÷戸数×100
愛知県：被害率＝{全壊＋0.5（半壊＋破損）}÷戸数×100

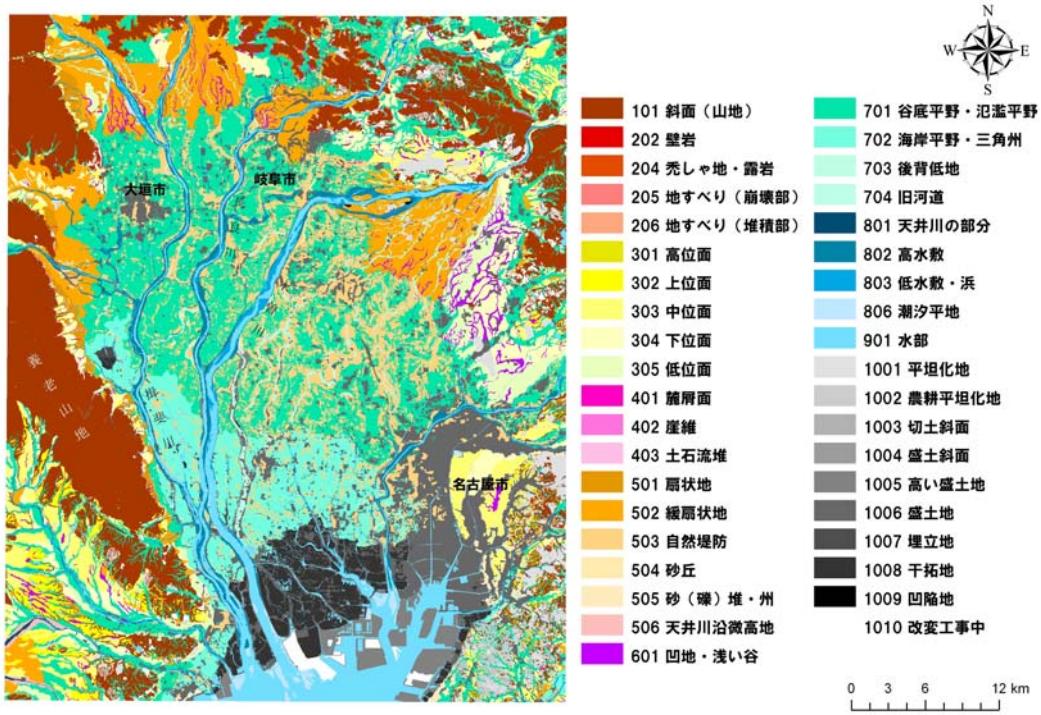
対象地域の土地条件図を図示したものを図－１に，住家被害率の等被害線図を図－２に示す．

図－１をみると，調査対象地域の地形的特徴は以下の通りである．木曽川，長良川，揖斐川の木曽三川は,北東部ないしは北部から濃尾平野に流れ込み，西に偏る形で濃尾平野の西側に位置する養老山地との境界付近を通過し，伊勢湾に注いでいる．各河川が山地から濃尾平野に流れ込む地点では，緩扇状地が発達している．濃尾平野は概ね北の方から，谷底平野・氾濫平野，海岸平野・三角州，干拓地に大きく３分される．谷底平野・氾濫平野のエリアでは，現在の河川や小河川・旧河川沿いに自然堤防が広がっている．また，名古屋の市街地部分には，盛土地が広がっている．

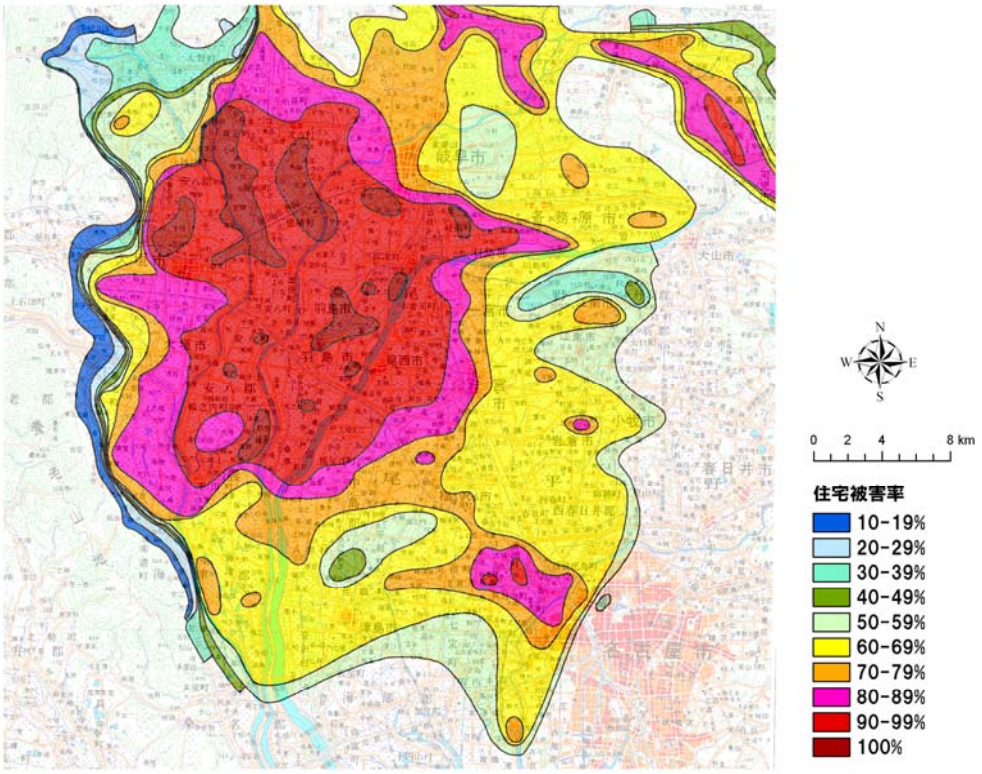
村松（1983）によると，濃尾地震を起こした地震断層である根尾谷断層に沿って住家被害率 100％の範囲が帯状に配列するが，断層帯から離れた濃尾平野でも，住家被害率が60％を超えるエリアが広範囲に広がっている．特に，濃尾平野北西部の岐阜市から大垣市にかけての木曽三川の沿線部で，広範囲に住家被害率が 80％を越えるエリアが広がっており，

その中で部分的に被害率 100%のエリアが島状に多数存在している．また，名古屋市街地の西側でも，被害率が 80%を越えるエリアが広く存在している．

本研究では，被害率毎のポリゴン情報をその地域の土地条件図と重ね，ポリゴンごとに面積を求め，地形分類別の被害率（被害率別の地形分類）を計算し，解析を行った．



図－１　濃尾平野の土地条件図



図－２　濃尾地震による濃尾平野の住家被害率の等被害線図（村松：1983 による）
（背景は 20 万分の 1 地勢図「岐阜」「名古屋」）

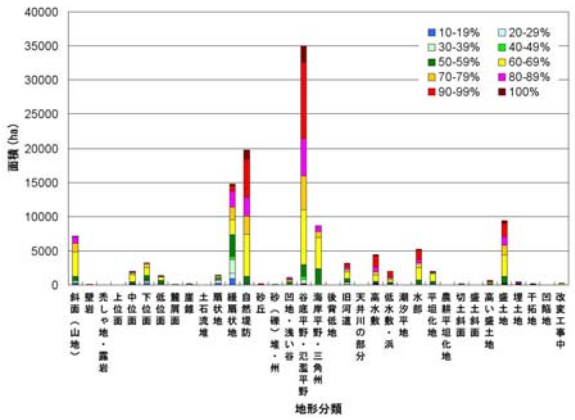
２．２　解析結果

住家被害率 10%以上の地区について，土地条件図の地形分類毎の面積をグラフにしたものを図－３に示す．この図では，棒グラフを住家被害率 10%毎に塗り分けて表示している．図－３で，被害率 10%以上の面積は谷底平野・氾濫平野，自然堤防，緩扇状地が極めて大きく，次いで，盛土地，海岸平野・三角州，斜面（山地）となっている．これらの住宅被害率 10%毎の割合を見てみると，谷底平野・氾濫平野，自然堤防で被害率が相対的に高く，斜面，緩扇状地で相対的に低い傾向が読み取れる．

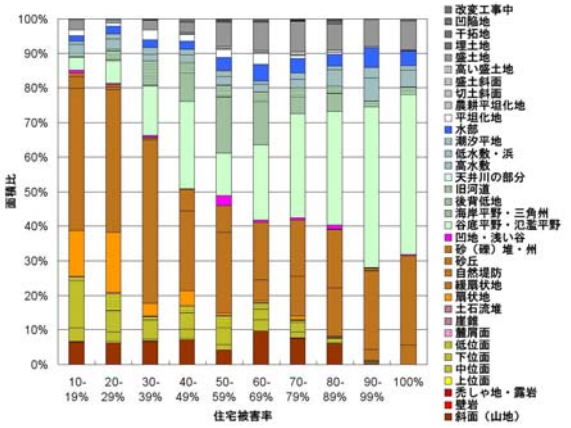
住家被害率毎の面積をグラフにしたものを図－４に示す．この図では，棒グラフを地形分類毎に塗り分けて表示している．図－４よりほとんどの地域で被害率が 50%を上回っていることが分かる．特に被害率 60～69%の面積が最も大きく，次いで被害率 90～99%の面積となっている．

同じものを，各地形分類の面積比でグラフにしたものを図－５に示す．図－５を見ると，被害率が高いポリゴンに出現する面積割合が高く，被害率が低くなると出現面積割合が低くなる地形分類と，その逆のパターンを示す地形分類が顕著である．被害率が高い方が出現面積割合が高い地形分類は，谷底平野・氾濫平野，自然堤防，盛土地などである．被害率が低い方が出現面積割合が高い地形分類は，扇状地，緩扇状地，段丘下位面などである．また，海岸平野・三角州は，住家被害率 40～89%で出現面積割合が大きくなっている．

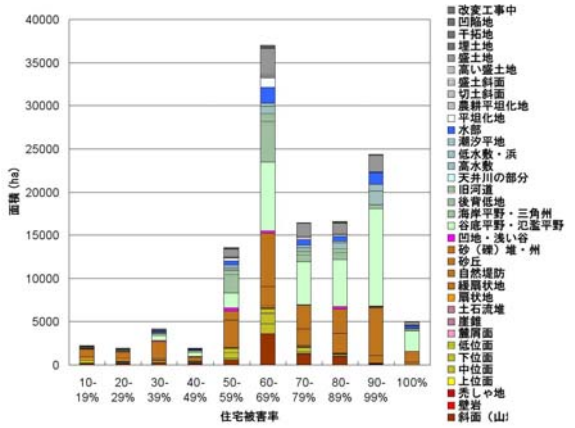
地形分類毎に，住家被害率 70%以上の面積割合が高い順に並べた棒グラフを図－６に，同様に住家被害率 49%以下の面積割合が高い順に並べた棒グラフを図－７に示す．図－６より，被害割合の高い上位３つは砂丘，谷底平野・氾濫平野，高水敷で，図－７より下位３つは天井川の部分，天井川沿微高地，段丘上位面であった．図－７で砂丘は住家被害率が 70%以上の地域がほとんどであったが，図－３をみると該当する箇所はそれほど広い面積ではないことが読み取れる．谷底平野・氾濫平野，自然堤防，埋土地，盛土地，干拓地などの住家被害率が高いことが読み取れる．その一方，天井川，段丘面，扇状地等の住家被害率が低いことが読み取れる．



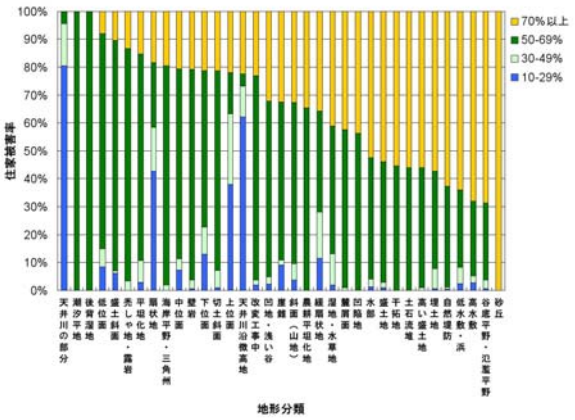
図－３　地形分類毎の住家被害率の面積



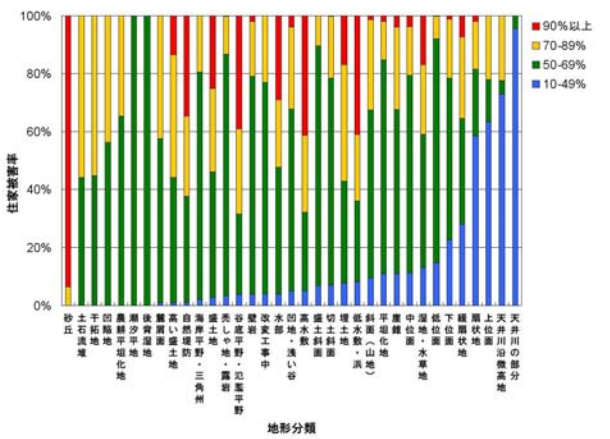
図－５　住家被害率毎の地形分類の面積比



図－４　住家被害率毎の地形分類の面積



図－６　住家被害率 70%以上の面積割合が高い順に並べた棒グラフ



図－７　住家被害率 49%以下の面積割合が高い順に並べた棒グラフ

２．３　考察

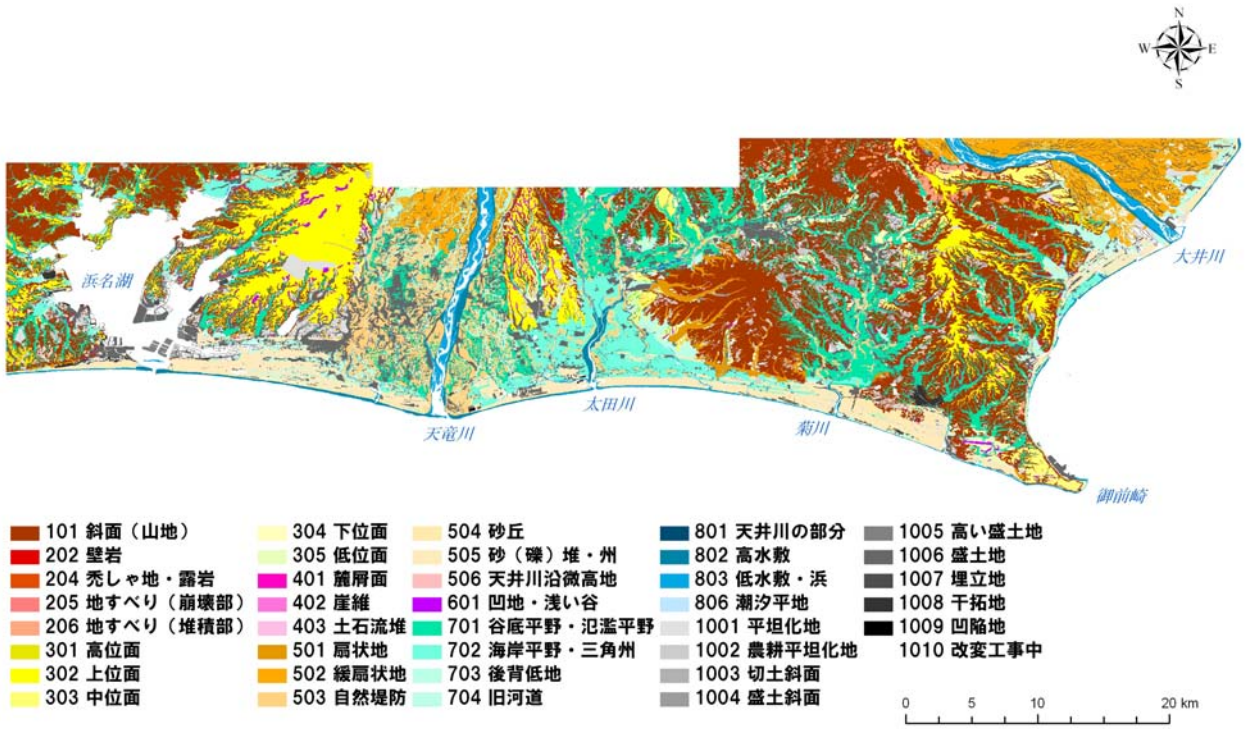
地形分類と住家被害率の関係は，基本的には段丘や扇状地性の地形など，地盤条件が良いとされている地形での被害率が相対的には低く，地形分類と建物被害との相関関係は，あるものと考えられる．一方，村松（1983）の被害率等値線図は，２次元上のデータを面的に等値線で結んでいるため，実際には住家のない地域も含めて等値線図が引かれている．従って,ある住家被害率のポリゴンの範囲に関して，住家の存在する地形分類については反映された住家被害率となっているが，住家の建っていない地形分類についても，住家被害率が算出されていることになる．明治初期の土地利用を考えると，地盤環境の悪い谷底平野，海岸平野等にはまだ住宅地が広く立地しているとは考えられず，そのような地形分類のエリアの住家被害率は厳密には計算でき無いものと考えられる．

今後の解析では，村松（1983）論文の原データにさかのぼって解析し，新たに GIS データを作成した上での解析が必要と思われる．特に集落毎のポリゴンデータを作成し，そのポリゴンに原データから算出した各集落毎の住家被害率を関連付けて GIS 解析をすることが望ましいと考えられる．

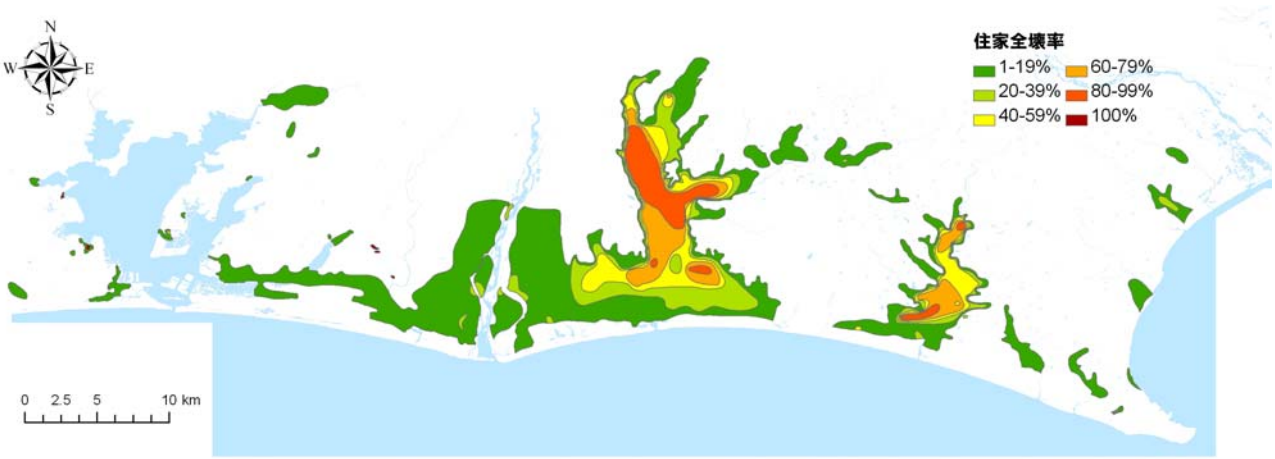
３．東南海地震の建物被害分布と土地条件

３．１　方法

1944 年紀伊半島南東沖で起きた M7.9 の東南海地震による住家全壊率分布図を作成し，その地域の土地条件図と重ね合わせて，被害の大きい土地条件を解析した．被害の情報としては，大庭（1957）の住家全壊率分布図を使用し，土地条件は，国土地理院刊行の土地条件図「浜松」「掛川」「磐田」「住吉・御前崎」のポリゴンデータを使用した．従って解析の対象地域は，静岡県の大井川から浜名湖にかけての遠州灘沿岸地域となる．土地条件図のポリゴン情報を図示したものを図－８に，大庭（1957）の住家全壊率分布図を図－９に示す．



図－８　東海地方遠州灘沿岸の土地条件図



図－９　遠州灘沿岸の 1944 年東南海地震による住家全壊率の等被害線図（大庭：1957 による）
（背景は土地条件図の水部）

この地域の地形的特徴は，大井川から太田川にかけて開析の進んだ山地（斜面）が分布しており，天竜川の西側と東側に広い面積の上位面が分布している．また，海岸沿いには海岸線に沿う形で砂丘，砂堆・砂州が帯状に連続して分布する．これらを横断する形で，東側から菊川，太田川，天竜川が遠州灘に流れてこんでいる．各河川の流域では，太田川流域では中流部以上で谷底平野・氾濫平野，下流部で海岸平野・三角州が広く分布し，菊川およびその他の中小河川では谷底平野･氾濫平野が主に分布する．それに対して天竜川に沿っては,上流から緩扇状地,自然堤防が主に分布し，自然堤防と交錯しつつ旧河道に沿って谷底平野・氾濫平野が分布している．

図－９の住家全壊率の方は，１％以上の地域を図示しているが，基本的には台地を刻む谷の部分で住家被害が出てきており，斜面や段丘上ではほとんど住家被害は出ていない．特に太田川沿岸の谷底平野部と菊川沿岸で住家被害率が高く，全壊率が 60％を越える地域が広く出現している．

Arc MAP を用いて，大庭（1957）の住家全壊率の等値線をトレースした．等値線内のポリゴンに情報を与え，その地域の土地条件のポリゴンと重ね合わせ，各ポリゴンの面積を求め，地形分類別の被害率（被害率別の地形分類）を計算した．

３．２　解析結果

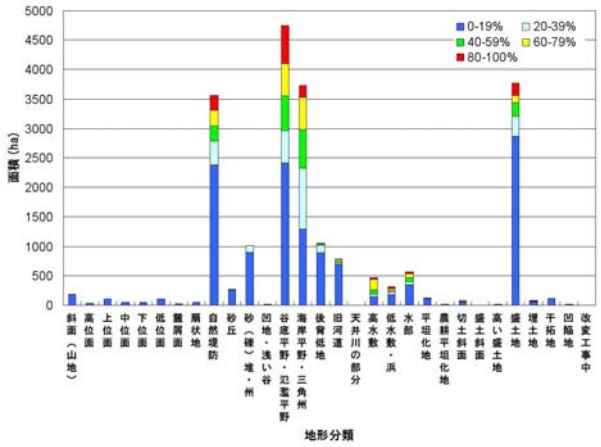
図－10 は今回対象地域（全壊率１％以上）の地形分類別面積を算出し，20％刻みで全壊率毎に色分け表示を行ったものである．谷底平野・氾濫平野，盛土地，海岸平野・三角州，自然堤防の面積が極めて大きいことが解る．

図－11 は 20％刻みの住家全壊率毎の面積を，土地条件図の地形分類毎の色分け表示で棒グラフにしたものである．全壊率が 20％より小さい地域が多く，20％以上の地域は面積が少ないことが解る．全壊率 20％以上の土地条件については，谷底平野・氾濫平野，海岸平野・三角州が多い．

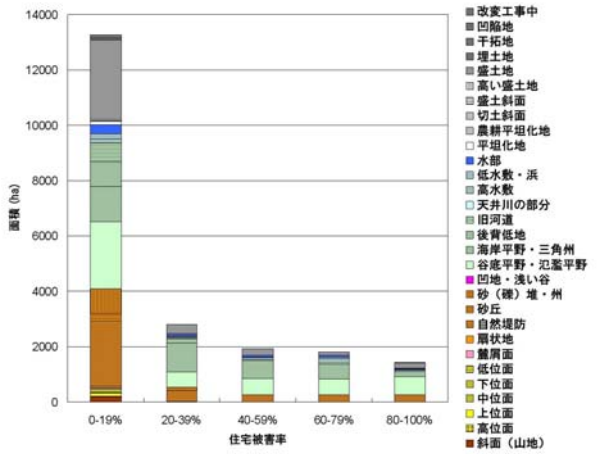
図－12 は 20％刻みの住家全壊率に応じて土地条件図の地形分類の面積比を図示したものである．全体的な傾向としては，自然堤防，谷底平野・氾濫平野，海岸平野・三角州が多くの割合を占めている．個別に詳細をみてみると，人工地形である盛土地が全壊率 80％～100％と０％～19％で出現割合が高い．これは，土地条件図が作成された時点で盛土地であることを示しているだけで，1944 年の発災時の地形を知るためには，旧版地形図と重ね合わせて当時がどのような地形であったのかを知る必要がある．現在，人工地形の盛土地であっても，当時，全壊率が 19％以下だった箇所がかなりあることが伺える．住家全壊率 40-59％，60-79％，80-100％において，谷底平野・氾濫平野が面積比 30％超となっている．とりわけ住家全壊率 80-100％では,その面積比が 40％超となっている．谷底平野・氾濫平野にも，太田川等の中小河川域に分布するものと，天龍川下流の自然堤防帯に分布するものがある．前者では住家全壊率が高く，後者では低い．地形分類上の谷底平野・氾濫平野だけでは，住家全壊率を説明するのは難しい．住家全壊率 20-39％，40-59％，60-79％において,海岸平野･三角州が面積比 30％超となっている．それらに対して，住家全壊率 1-19％，80-100％ではその面積比はそれぞれ 9.8％，13.7％と半分以下となっている.住家全壊率 1-19％,20-39％,40-59％,60-79％,80-100％において,自然堤防が面積比 13％超となっており，ほぼ一定の面積比を占めている．

地形分類毎に,住家全壊率 60％以上の地域の面積割合が高い順に並べた棒グラフを図－13 に,同様に住家全壊率 19％以下の地域の面積割合が高い順に並べた棒グラフを図－14 に示す．図－13，14 より，

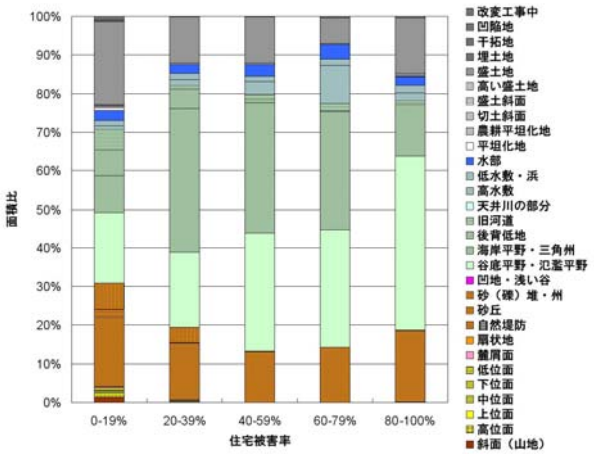
全壊割合の多い上位３つは盛土斜面，天井川の部分，高水敷で，下位３つは改変工事中を除くと，凹陥地，干拓地，農耕平坦化地であった．図－13，14 で，盛土斜面は 60%以上（実際には 100%）の全壊率のみで占めているが，図－10 の盛土斜面をみると面積はほとんどない．全体として全壊率が 20%より小さい面積が大きいが，図－14 で後背湿地から右側の地形分類に注目すると，住家全壊率 0-19%が面積比 80%超となっている．図－13 では，盛土斜面，天井川の部分，高水敷で住家全壊率 60%以上が，面積比 40%超となっている．



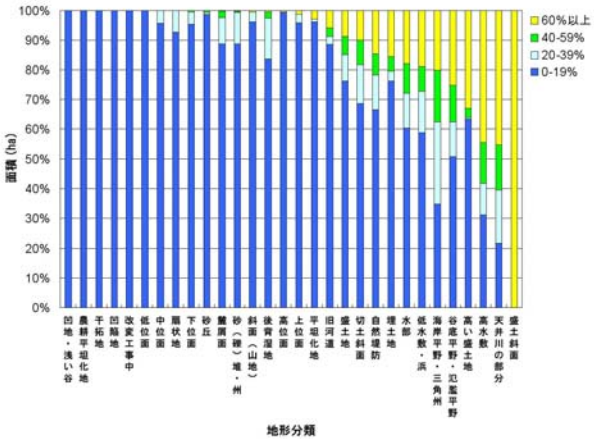
図－10　地形分類毎の住家全壊率の面積



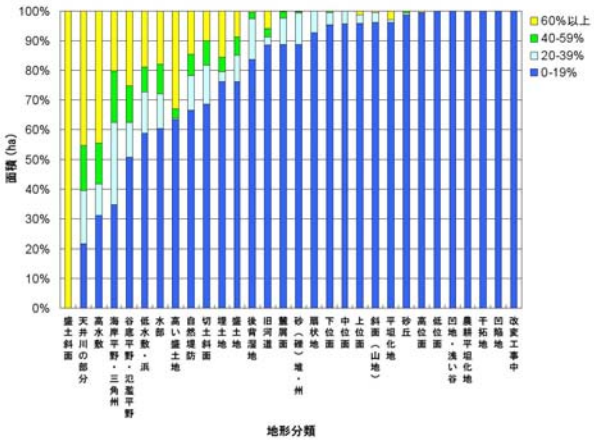
図－11　住家全壊率毎の地形分類の面積



図－12　住家全壊率毎の地形分類の面積比



図－13　住家全壊率 60%以上の面積割合が高い順に並べた棒グラフ



図－14　住家全壊率 19%以下の面積割合が高い順に並べた棒グラフ

３．３　考察

地形分類と住家全壊率の関係は，基本的には段丘や扇状地性の地形など，地盤条件が良いとされている地形での被害率が相対的には低く，谷底平野・氾濫平野，海岸平野・三角州では高く，地形分類と建物被害との相関関係は，あるものと考えられる．

一方，大庭（1953）の等被害線図は村松（1983）と同様に実際の被害を等値線で結んでいるため，実際には住家のない地域も含めて等値線図が引かれている．従って，ある住家全壊率のポリゴンの範囲に関して，住家の存在する地形分類については反映された住家被害率となっているが，住家の建っていない地形分類についても，住家全壊率が算出されていることになる．戦時中の土地利用を考えると，地盤環境の悪い土地条件の箇所はまだ住宅地が広く立地しているとは考えられず，そのような地形分類のエリアの住家被害率は厳密には計算でき無いものと考えられる．

また，面積の大きい地形は被害率も大きく出やすいため，より詳細な解析（地形分類の面積を考慮した解析）も必要と考える．

４．安政東海地震の震度と土地条件

４．１　方法

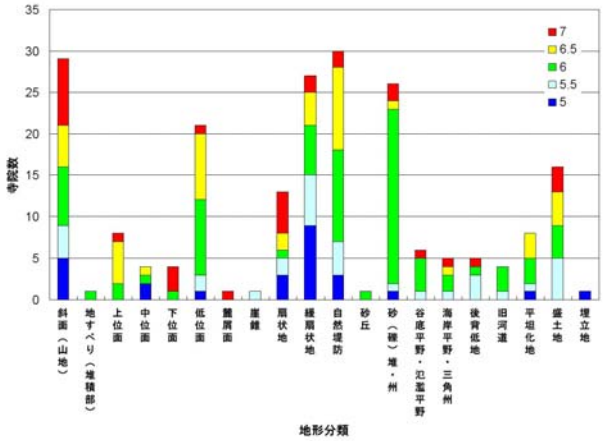
1854 年安政東海地震の寺院被害記録から静岡県内の震度を推定した情報（行谷・都司：2006）と，土地条件図と重ね合わせて解析を行った．行谷・都司（2006）の震度推定方法は以下の通りである．安政東海地震の寺院倒潰記録は，大正年間に市町村誌を編纂するために，組織的に小学校の校長たちによって調査されたもので，大正年間当時生存した住職たちの直接証言による信憑性の高いデータである．被害の情報としては，寺院の被害の度合いを倒潰ポイントとして表示し，寺院の主要構造物が全潰の場合 1.0，半壊 0,5，大破 0.3，中破 0.2，小破 0.1 とした．ここで倒潰ポイントから寺院倒潰率を算出するために，震度評価しようとしている寺院から半径２km に存在する寺院の加重平均値を計算し，これを寺院倒潰率とした．寺院倒潰率 85%以上を震度７とし以下，55～85%，30～55%，16.5～30%および，16.5%以下をそれぞれ震度６～７，震度６，震度５～６，震度５以下とした．行谷・都司（2006）では付表として，寺院の名称，緯度･経度（秒まで表示），倒潰ポイント，評価震度，被害記事，出典等が整理されている．これらのデータを GIS のポイントデータとして整備し，土地条件のポリゴン情報と重ね合わせて解析を行った．寺院のポイントデータは総数 234 個あり，伊豆半島，三島・沼津地域から浜松地域まで静岡県沿岸の全域に広がっている．この内現在の地形図と対照して位置が正確に同定できない寺院や土地条件図が存在しない箇所の寺院を除いた 215 地点について，土地条件図の地形分類ポリゴン情報と重ね合わせて解析を行った．土地条件図は，「沼津」「吉原」「清水」「静岡」「住吉・御前崎」「掛川」「磐田」「浜松」のポリゴンデータを使用した．

４．２　解析結果

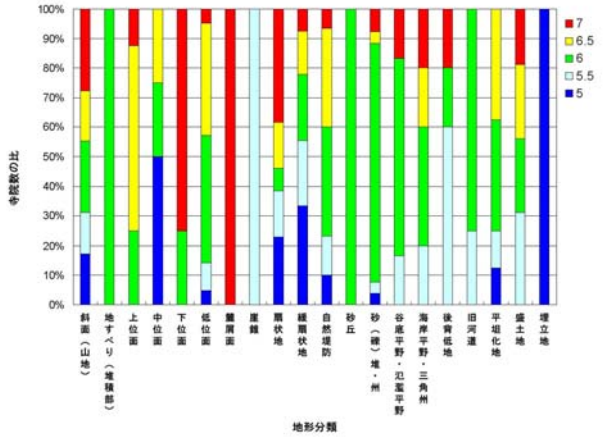
震度推定した 215 地点について，土地条件図の地形分類毎に集計してグラフにしたものを図－15 に示す．この図では，棒グラフを想定震度毎に塗り分けて表示している．同様のものを百分率で表示したグラフを図－16 に示す．図－15 で地点数が 20 以上のものを多い順に並べると自然堤防，斜面（山地），緩扇状地，砂（礫）堆・州，低位面の順となる．この内，震度７は斜面（山地）で個数が多く，自然堤防と低位面では震度６～７と震度６が，砂（礫）堆・州では震度６が，緩扇状地では相対的に震度５と５～６が多いのが特徴的である．同様の傾向は図－16 でも読み取れるが，麓屑面で震度７が 100%，埋立地で震度５が 100%なのは地点数が１点しか無いためである．

震度推定した 215 地点について，推定震度毎に集計してグラフにしたものを図－17 に示す．この図では，棒グラフを地形分類毎に塗り分けて表示している．同様のものを百分率で表示したグラフを図－18 に示す．震度６の地点数が約 80 と最も多く，次いで震度６～７の地点が約 45 点と多く，残りの震度は約 30 地点とほぼ同数である．斜面（山地）はどの震度でもほぼ同じ程度の地点数であるに対し，震度６に占める砂（礫）堆・州の割合が高く，地点数でも震度６に集中しているのが特徴的である．震度６と６～７については自然堤防と低位面の割合が高く，震度５と５～６では緩扇状地の割合が高い．分布傾向として，扇状地が震度の大きな地点で相対的に多くなっているのに対して，緩扇状地は震度の小さな地域で相対的に多くなっている．

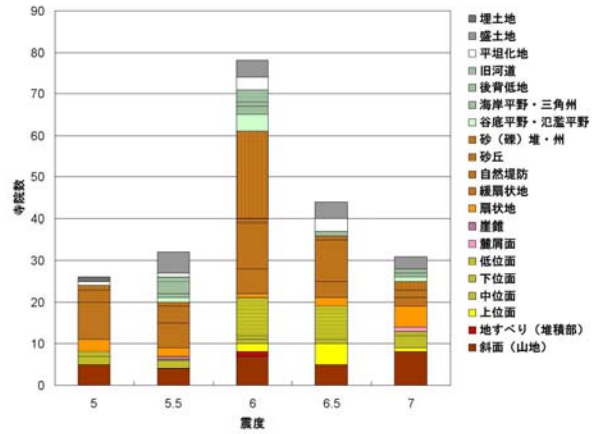
地形分類毎に，震度７の地点の割合が高い順に並べた棒グラフを図－19 に，同様に震度５の地点の割合が高い順に並べた棒グラフを図－20 に示す．個数が少ない地形分類はそれにより大きく割合が影響を受けてしまうために簡単には判断できないが，一般に地盤が良いとされている段丘面，麓屑面，扇状地等で必ずしも震度が小さいという傾向があるわけでもなく，逆に震度が大きい地点の割合が高い例もある．



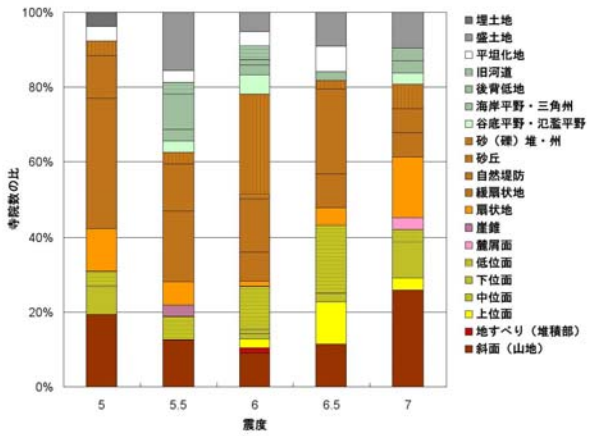
図－15　地形分類毎の震度別地点数



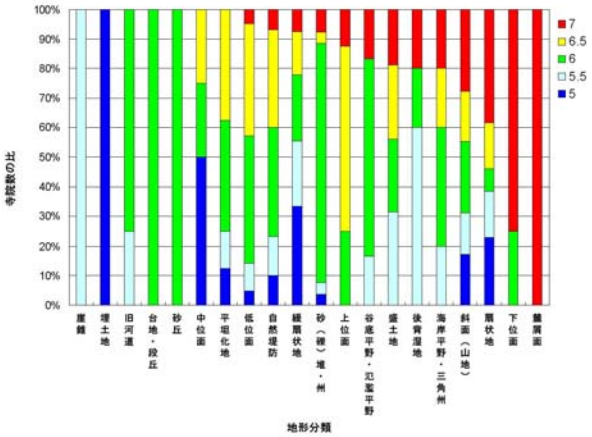
図－16　地形分類毎の震度別割合



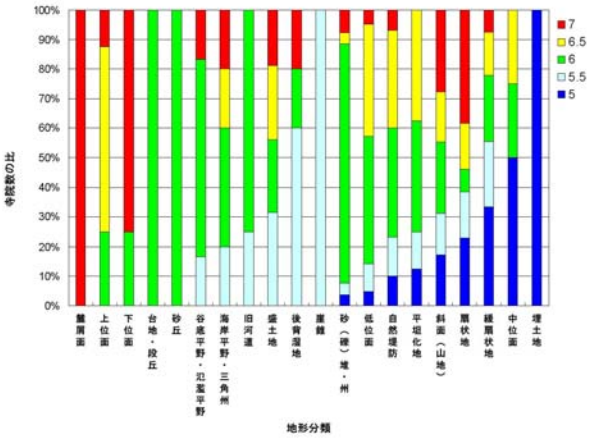
図－17　震度毎の地形分類別地点数



図－18　震度毎の地形分類別割合



図－19　震度７の地点割合が高い順に並べた棒グラフ



図－20　震度５の地点割合が高い順に並べた棒グラフ

４．３　考察

安政東海地震に関してはポイントデータでの土地条件ポリゴンとの重ね合わせ解析であるために，これまでの２例の等被害線図での重ね合わせと違って建物のないところでの重ね合わせを行っているということはない．しかしながら，土地条件と建物被害（ここでは震度）との関連性については，前２例と比べると必ずしも明確ではなく，中には通常の予想とは逆の結果を示すものも多かった．その理由としては，寺社の特殊な立地条件が考えられる．当時は江戸時代であり，寺社や住家は比較的地盤条件の良い立地で存在していたものと考えられる．従って，地盤の良くない谷底平野や海岸平野等に寺社が立地していた可能性はほとんど無く，基本的には地盤の

良い地形の中での震度の比較ということになる．また寺社は集落の真ん中に立地している可能性もあるが，集落の一番外れや見晴らしの良い丘の上や山間部に立地している可能性も高い．斜面（山地）の地点数が多いのもその現れである可能性が高い.今回，斜面（山地）と扇状地での震度７の地点数が多かったが，地形的な出っ張りに立地して揺れが集積しやすい地形効果等の影響があった可能性も考えられる.

５．おわりに

今回，土地条件図の地形分類のポリゴン情報と既往災害の情報（過去の地震による建物被害情報）とをGISにより重ね合わせ解析を行い，地震による地盤災害と土地条件との関連性を考察した.その結果，地盤条件が良いとされている段丘や扇状地（緩扇状地を含む）では建物被害が相対的に小さく，自然堤防，谷底平野・氾濫平野，海岸平野・三角州で相対的に建物被害が大きいという結果であった．しかしながら，３つの地震被害の被害率の算定方法もそれぞれの方法で違い，また安政東海地震では寺院の倒壊情報を震度に置き換えたポイントデータとして解析を行っており，それぞれの解析によって定義が異なっている．また，建物の等被害線図で解析を行った事例では，実際には建物が立地していない谷底平野・氾濫平野等まで含めて等値線が引かれているという問題もある．一般に地盤条件が良いとされている自然堤防で被害が大きかったが，当時の住宅地は地盤の良い自然堤防上に立地し，地盤の悪い谷底平野・氾濫平野等にはほとんど立地していない．そのため，今回の建物被害の大小は地盤条件の比較的良い自然堤防上での,より局所的な地盤の良し悪しや,地下構造などの比較的規模の大きな要素が反映されている可能性があり得る．従って，地形的な条件だけでなく，軟弱地盤の深さや厚さ等の地下の地盤地質条件等も考慮して考える必要がある．今回の解析報告はあくまでも予報的なものであり，今後ボーリングデータ等を収集して，地下構造的な視点も加えて考察していく必要があると考える．東海地方ではＮ値に着目した研究として，須長・熊木（1982）などがあり，これらの先行研究も参考にしながら，検討を進めていきたい.

謝　辞

本研究で使用したポリゴンデータの作成や解析業務は，地理情報解析研究室にインターン実習で来ていた筑波大学大学院生の森口有里氏と，当室非常勤職員の村上弘明氏に手伝っていただいた．心から感謝します．また，この研究は，科学研究費補助金「空間地理情報の最適利用に基づく「リアリティのあるハザードマップ」の開発」(研究代表者：鈴木康弘名古屋大学教授）の費用を使用している.

参 考 文 献

大庭正八（1957）：1944年12月7日東南海地震に見られた遠江地方の家屋被害分布と地盤との関係，東京大学地震研究所彙報，35，201-295.

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，第56集，24-31.

行谷佑一，都司嘉宣(2006)：寺院の被害記録から見た安政東海地震(1854)の静岡県内の震度分布，歴史地震，21，201-217.

村松郁栄（1983）：濃尾地震による濃尾平野の住家被害率分布，岐阜大学教育学部研究報告，7，867-882.