

3. 3. 5 プレート間地震モデル化の研究（史料・震度）

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：プレート間地震モデル化の研究（史料・震度）

(b) 担当者

東京大学地震研究所	助教授	都司嘉宣	tsuji@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	教授	瀨瀬一起	koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp
東京大学地震研究所	大学院生	行谷祐一	namegaya@eri.u-tokyo.ac.jp
鹿島建設小堀研究室	室次長	武村雅之	takemurm@kajima.com
鹿島建設小堀研究室	上席研究員	神田克久	kandak@kajima.com
筑波大学システム 情報工学研究科	助教授	境 有紀	sakai@kz.tsukuba.ac.jp
筑波大学システム 情報工学研究科	大学院生	大月俊典	e011269@edu.esys.tsukuba.ac.jp

(c) 業務の目的

地震は低頻度の自然現象であり、比較的頻繁なプレート間地震でもその繰り返し周期は数十年以上になっている。そのため、ある震源域の特性を調べるために過去の地震を遡ろうとしても、地震計の記録がまったく得られないか、得られても遡れるのは直近の一地震だけという場合がほとんどである。直近を越えてさらに過去の地震へ遡るとなると、震度の情報が唯一のデータとならざるを得ない。その震度データも明治・大正時代ならば中央気象台などから発表されたものが存在する可能性があるが、それ以前では古文書などから被害の情報を抽出し、それを震度データに変換することになる。

こうした過去の地震を解析するには、唯一のデータである震度データを活用する道しか残されていない。本研究ではその活用方法を開発して、地震計記録のない時代の地震、特に相模トラフおよびその延長上で発生した元禄地震から震源の情報を引き出し、強震動予測における震源モデル化の精度向上を図ることを目的とする。

(d) 5 ヶ年の年次実施計画

平成 14 年度：検証用被害データ収集、解析手法の開発、高度被害の震度変換法

平成 15 年度：元禄地震の被害データ収集、解析手法の検証、中低度被害の震度変換法

平成 16 年度：元禄地震の解析、建物耐震性能等の時代変遷の検討

平成 17 年度：元禄地震の津波データ収集、社会的状況の被害への影響評価

平成 18 年度：震度データ・津波データの同時解析、時代変遷・社会的状況の考慮

(e) 平成 17 年度業務目的

前年度に引き続き、古文書等の解読により元禄地震の被害データを収集し震度への変換を行う。また、前年度に震度インバージョン解析によって得た大正関東大地震の短周期地震発生域の物理的な意味の考察を行う。更に、歴史地震史料と対応する震度を用いた地震動強さの面的分布を求める事を目的として、表層地盤データを利用する数値手法の開発を行う。

(2) 平成17年度の成果

(2-1) 元禄地震の東京都内の詳細震度分布

都司嘉宣（東京大学地震研究所）

行谷佑一（東京大学地震研究所）

(a) 業務の要約

元禄地震（元禄十六年十一月二十三日、1703年12月31日）の被害データを収集してデータベースを作成する作業を前年度に引き続き行った。また、東京都内の被害データを震度に変換し、かつ「改撰江戸大絵図」（元禄十五年、1702年刊行）¹⁾を用いてその被害データが表す地点が現在のどの地点かをピンポイントで調べた。その結果、東京都内のおもに23区内での詳細な（ピンポイント的な）震度分布を得ることができた。

(b) 業務の実施方法

元禄地震(1703)に関する文献資料は武者(1941)²⁾、地震研究所(1982, 1989, 1994)^{3)~5)}に数多く集積されている。ことに地震研究所(1982)³⁾は全巻が元禄地震(1703)の史料である。これらの文献史料を用いて、江戸の市街地に対してその詳細震度分布を得る試みは過去にいくつかあった（たとえば、都司ら・2003、都司・2003など）^{6),7)}。これらによると、現在の皇居とJR東京駅の間の丸の内から北方、大手町、神田神保町、北の丸、水道橋にかけて震度が強く表れるところがあり、その位置は中世以前、太田道灌が江戸城を築く前の中世江戸地図における日比谷入り江と平川の流域に一致していることを指摘している。

しかしながら、これらの過去の研究では扱えなかったデータというものが存在する。すなわち、過去の研究でも、古文獻史料に基づく元禄地震(1703)の江戸市中の震度分布の推定を行っているのだが、それらに記された地名については、現代地図上での照合作業が十分ではなかった。たとえば原文書に「津軽藩中屋敷」と書かれていても、その元禄十六年(1703)当時の所在については調査する方法が見出せず、これらのデータは「地図上にプロットできないデータ」として震度分布図への採用を見合わせざるを得なかったのである。

いっぽう近年、元禄地震(1703)の前年の元禄十五年(1702)に作成された「改撰江戸大絵図」¹⁾が人文社から復刻された(2003)。この絵図の原本の書き込みに従えば、この絵図は元禄地震(1703)の前年の元禄十五年(1702)二月に遠近道印（おちこちどういん）によって大門通板屋弥兵衛という版元から頒布されたものである。地図の範囲は、江戸城からだいたい二里までの範囲で、北は千駄木付近、西は四谷から新宿付近、南は目黒・品川、東は本所深川までの範囲であり、現代の住宅地図なみに当時住んでいた人の名前がびっしり書き込まれている地図である。

ところで、幕府の長老格の大名の屋敷は江戸時代全体を通じてそれほど変化していないが、それ以外の一般の大名の屋敷は江戸時代の各時代に盛んに配置が変更された。ましてやその下位の旗本となると、より頻繁に邸宅敷地の移転が行われた。このため、たとえば幕末の嘉永・安政期の江戸絵図では、元禄地震の記事を理解する上でほとんど参考とすることはできないのである。この点でこの「改撰江戸大絵図」¹⁾は元禄地震(1703)の前年に刊行されており、元禄地震の各文献を理解する上で第一級の史料ということになるであろう。

以上のことをふまえて、本業務ではおもに以下のことを行った。

(1) 原文献から元禄地震(1703)によってどこで何が起きたかのデータベースをまず作成した。このデータベースにはおもに、史料の名前(出典)、その史料集でのその記事の記載ページ、原文献名、原記載の内容、原記載での地名表記を書き込んだ。

(2) 「改撰江戸大絵図」¹⁾や地名辞書(平凡社・2002、および角川書店・1988)^{8),9)}によって、その史料上の地点名が現代地図上のどの地点、または範囲にあたるのかを確定した。さらに現代地図によって現代の行政区画での相当現住所名を調べ、その地点、または当時の町の範囲の中心付近の北緯東経を少なくとも秒の単位まで読み取った。たとえば「鶴殿の邸宅」のように地点が精度良く確定している場合には、そのピンポイントの北緯東経を秒単位までの精度で読み取った。

(3) 本業務では本震の六日後の十一月二十九日に起きた火災に関する記事はすべて無視することにした。また、遠方で伝聞や風聞を記録した物、あるいははるか後代に文字化された記事については、その場所で直後に直接体験者や当時の責任ある為政者によって書かれた、より信頼度の高い文献で状況把握がカバーされる場合には、これらはすべて無視することにした。

(4) これらの被害記事から現行の気象庁震度を推定する作業では、宇佐美ら(1994)¹⁰⁾、および中村ら(2003)¹¹⁾を参考にした。ただし、ある地点での建物の被害記事からその地点での震度を判定する、というピンポイントの判断であるため、一定の地域の潰家数の全体数に対する比率という震度推定方法を採用できなかった。このため震度7という区分は現れない。すなわち、震度6強を最大震度とした。

以上の作業によって、現在の東京都の範囲を対象として、244の震度判定を行うことができた。このうち、228が東京23区内に関するものである。このデータベースの一例を付表に示した。

(c) 業務の成果

(b)で説明した方法を用いて得られた成果の一例を報告しよう。地震研究所(1982)³⁾の23ページ下段には、「文鳳堂雜纂 変災部五十五」の中の「大名屋敷 御旗本屋敷破損如左」で始まる、個々の大名・旗本屋敷の被災状況を伝える次の記事が現れる。

外長屋潰	鶴殿十郎左衛門
塀損・本宅半潰	蜂屋主水
門・塀潰	大沢主膳
練塀崩	中山主馬
長屋・居宅共損	三枝日向守
長屋少塀トモニ損ス	三枝勘之丞
長屋損	溝口摂津守
(後略)	

これまでの研究では、元禄地震(1703)当時のこれらの大名・旗本の居場所、すなわち鶴殿十郎左衛門や蜂屋主水などの居宅位置が不明であった。したがって、鶴殿十郎左衛門の

居宅位置では「外長屋潰」であって震度 6 弱程度の揺れであったことは判明していたがその現在地が不明であり、地図上にプロットできなかった。しかしながら、「改撰江戸大絵図」¹⁾の復刻により、たとえば鶴殿十郎左衛門の居宅は現在の千代田区専修大学付近であることが判明した。図-1 は「改撰江戸大絵図」¹⁾に上記の「文鳳堂雜纂 変災部五十五」の記録から判定された震度をプロットしたものである。図-1 では「ウドノ」やあるいは「ハチヤ」といった文字が見受けられる。

また、文献から震度判定を行い、「改撰江戸大絵図」¹⁾によりその文献が表す地点を明らかにして、これらの情報を二万五千分の一地図にプロットしたものが図-2 である。この図より、皇居と東京駅に挟まれた日比谷、丸の内、大手町、呉服橋、さらにそこから皇居の北縁に沿って西におれて竹橋、北の丸のあたりで軒並み震度 6 強の揺れであったことがわかる。また、この区域の南に連なる現代の新橋駅付近の震度も大きかったことがわかる。これに対して、江戸城の北西方向である市ヶ谷、四谷方向では震度はおおむね 5 強以下であって、比較的被害は軽かったことがわかる。

(d) 結論ならびに今後の課題

元禄地震(1703)の被害記事および「改撰江戸大絵図」¹⁾を用いることで、おもに皇居周辺のピンポイント的な震度分布を得ることができた。既存の研究では得られなかった、現代地図の街路区画の一個一個を区別した詳細な震度分布が得られている。この得られた震度分布から、各街区のきわめてローカルな地質条件が敏感に反映したことが示唆される。今後は、ここで得られた東京都の震度分布や、前年度得られた神奈川県、および千葉県、および東京都の震度分布などを用いて、より確かな元禄地震(1703)の断層モデルを推定することが課題であろう。

(e) 引用文献

- 1) 人文社：「改撰江戸大絵図」(原典：元禄十五年，1702)，1 枚，2003.
- 2) 武者金吉：「増訂・大日本地震史料・第二巻」，文部省震災予防評議会，pp.754，1941.
- 3) 地震研究所：「新収・日本地震史料・第二巻・別巻」，pp.290，1982.
- 4) 地震研究所：「新収・日本地震史料・補遺・別巻」，pp.992，1989.
- 5) 地震研究所：「新収・日本地震史料・続補遺・別巻」，pp.1228，1994.
- 6) 都司嘉宣・中村操・武村雅之・諸井孝文：「江戸・東京の地震，ドキュメント災害史・1703-2003」，国立歴史民族博物館，pp.41-55，2003.
- 7) 都司嘉宣：「元禄地震 300 年」，地震ジャーナル，36，pp.1-7，2003.
- 8) 平凡社：「東京都の地名，日本歴史地名大系第 13 巻」，pp.1453，2002.
- 9) 角川書店：「角川日本地名大辞典・13・東京都」，pp.1253，1988.
- 10) 宇佐美龍夫・渡辺健・西村功：「我が国の歴史地震の震度分布・等震度線図について」，歴史地震，10，pp.63-75，1994.
- 11) 中村操・茅野一郎・唐鎌郁夫・松浦律子・西山昭人：「安政江戸地震(1855/11/11)の江戸市中の被害」，歴史地震，18，pp.77-96，2003.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等.

著者	題名	発表先	発表年月日
都司嘉宣、 上田和枝、 行谷佑一、 伊藤純一	2006, 元禄十六年十一月二十三日(1703年12月31日)南関東地震による東京都の詳細震度分布	歴史地震 21	出版中
都司嘉宣、 上田和枝、 伊藤純一、 行谷佑一	元禄地震(1703)の詳細震度分布	第22回歴史地震研究発表会 東京都墨田区江戸東京博物館	2005年9月 16日～18日
伊藤純一、 都司嘉宣、 上田和枝	元禄十六年(1703)南関東地震のピンポイント詳細震度分布	日本地震学会 2005年秋 季 北海道大学	2005年10月 19日～ 21日

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

(f) 仕様・標準等の策定

なし

付表 元禄地震(1703)の被害データベースの一例

区名	現住所	史料上の 原地名	経度			緯度			現在地の目安	ビ 震 度	古文書の記述	出典	ペー ジ 数	文書名
			度	分	秒	度	分	秒						
港区	芝3丁目	芝神(新)堀端	139	44	57	35	39	5	芝2丁目と芝3丁目の境界	1 6+	地大に破損す	新収2-別	25	[文鳳堂雑纂 変災部五十五]、[甘露叢、史料2-44p]
港区	虎ノ門3丁目	天徳寺門前	139	44	51	35	39	51	天徳寺門前	1 6+	名主孫兵衛届けに、天徳寺門前町で17軒地震に崩	新収2-別	52	[災変温古録]
千代田区	内幸町1丁目	本多中務大輔屋敷	139	45	13	35	40	21	日比谷音楽堂	1 6+	北表長屋所々にて六十余間倒	新収2-別	24	[文鳳堂雑纂 変災部五十五]、[甘露叢、史料2-44p]
千代田区	内幸町1丁目	山下御門箱番所	139	45	35	35	40	21	みゆき座、JRの付近	1 6+	山下御門箱番所箱番所潰	新収2-別	23	[文鳳堂雑纂 変災部五十五][甘露叢、史料2-42p][甘露叢、史料2-42p]
千代田区	霞ヶ関1丁目	永井伊賀守屋形	139	45	10	35	40	22	東京家庭裁判所	1 6+	外桜田で甲府中納言、永井伊賀守、酒井石見守、酒井杏岐守、各屋形みじんとなる	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	日比谷公園	酒井杏岐守屋形(旗本)	139	45	23	35	40	22	日比谷公園内	1 6+	外桜田で甲府中納言、永井伊賀守、酒井石見守、酒井杏岐守、各屋形みじんとなる	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	有楽町1丁目	青山播磨守屋形	139	45	30	35	40	23	日生劇場	1 6+	日比谷御門内で青山播磨守、松平下野守、戸田能登守、土屋相模守、土屋山城守、秋元但馬守、井上大和守、松平右京太夫、松平美濃守、小笠原佐渡守、各屋形みじ	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	有楽町2丁目	数寄屋橋御門御番所	139	45	45	35	40	23	数寄屋橋交差点	1 6+	数寄屋橋御門御番所倒	新収2-別	134	[地震記 完(西尾市岩瀬文庫)]
千代田区	日比谷公園	酒井石見守屋形	139	45	20	35	40	26	日比谷公園内松本楼付近	1 6+	外桜田で甲府中納言、永井伊賀守、酒井石見守、酒井杏岐守、各屋形みじんとなる	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	有楽町1丁目	戸田能登守屋形	139	45	37	35	40	28	日比谷パークビル	1 6+	日比谷御門内で青山播磨守、松平下野守、戸田能登守、土屋相模守、土屋山城守、秋元但馬守、井上大和守、松平右京太夫、松平美濃守、小笠原佐渡守、各屋形みじ	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	有楽町1丁目	松平下野守屋形	139	45	42	35	40	28	有楽町駅西口南、電気ビルディング	1 6+	日比谷御門内で青山播磨守、松平下野守、戸田能登守、土屋相模守、土屋山城守、秋元但馬守、井上大和守、松平右京太夫、松平美濃守、小笠原佐渡守、各屋形みじ	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	日比谷公園	甲府居所	139	45	28	35	40	30	日比谷公園第一花壇	1 6+	甲府居所過半崩れ	史料2	38	[基ひろ公記]
千代田区	日比谷公園	甲府中納言屋形	139	45	28	35	40	30	日比谷公園第一花壇	1 6+	外桜田で甲府中納言、永井伊賀守、酒井石見守、酒井杏岐守、各屋形みじんとなる	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	日比谷公園	日比谷御門	139	45	31	35	40	38	環境庁皇居外苑管理事務所	1 6+	日比谷御門大番所潰、塀残らず倒れ、当番土方市正家来徒目付傷1、小人傷2、家中1人傷、足軽四人傷	新収2-別	23	[文鳳堂雑纂 変災部五十五][甘露叢、史料2-42p]
千代田区	皇居外苑	柳生備前守屋敷	139	45	26	35	40	41	皇居外苑橋正成徳西側	1 6+	内座敷等残らずがみ長屋七十間余倒り塀土蔵潰	新収2-別	24	[文鳳堂雑纂 変災部五十五]
千代田区	千代田	桜田門	139	45	13	35	40	43	桜田門前	1 6+	大きに傾き鉄をまいた御門の柱さけ、20間余の棟木震り打ち	新収2-別	57	[元正間記]
千代田区	皇居外苑	大久保隠岐守屋敷	139	45	21	35	40	44	二重橋前の皇居外苑	1 6+	地震につき大久保隠岐守屋敷13人死	新収2-別	148	[鸚鵡駕籠中記(朝日文左衛門重章の日記)]
千代田区	皇居外苑	馬場先御門	139	45	34	35	40	44	馬場先門内	1 6+	大番所、箱番所潰、死1、傷1、御門外御堀南の方石垣5、6間崩	新収2-別	23	[文鳳堂雑纂 変災部五十五][甘露叢、史料2-42p]
千代田区	丸の内2丁目	土屋相模守屋形	139	45	43	35	40	50	東京海上ビル新館	1 6+	日比谷御門内で青山播磨守、松平下野守、戸田能登守、土屋相模守、土屋山城守、秋元但馬守、井上大和守、松平右京太夫、松平美濃守、小笠原佐渡守、各屋形みじ	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	千代田	喰違御門	139	43	55	35	40	53	ホテルニューオオタニ敷地北西角、上智大学グラウンド南東角	1 6+	下御勘定部屋より喰違御門まで残らず潰、三の丸土蔵、揺りつぶし、大御留守居与力番所、二の丸銅御門冠木番所、紅葉山下かぶき番所、内桜田御門番所、大手腰掛け、西丸下御殿が潰、破損	新収2-別	76	[東京市史稿 皇城]
千代田区	皇居外苑	阿部豊後守藩邸	139	45	36	35	40	53	二重橋前北側内堀通り上	1 6+	西丸下の大久保隠岐守、阿部豊後守、加藤越中守、稲葉丹波守、柳生備前守、各藩邸屋形みじんとなる	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	皇居外苑	加藤越中守藩邸	139	45	19	35	40	54	坂下門南	1 6+	西丸下の大久保隠岐守、阿部豊後守、加藤越中守、稲葉丹波守、柳生備前守、各藩邸屋形みじんとなる	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)
千代田区	丸の内2丁目3	八重洲河岸	139	45	45	35	40	54	郵船ビル	1 6+	地大に破損す	新収2-別	25	[文鳳堂雑纂 変災部五十五]
千代田区	皇居外苑	稲葉丹波守藩邸	139	45	30	35	40	58	桔梗門南側	1 6+	西丸下の大久保隠岐守、阿部豊後守、加藤越中守、稲葉丹波守、柳生備前守、各藩邸屋形みじんとなる	新収2-別	95	[震火記](「江戸の災害情報」に引用)

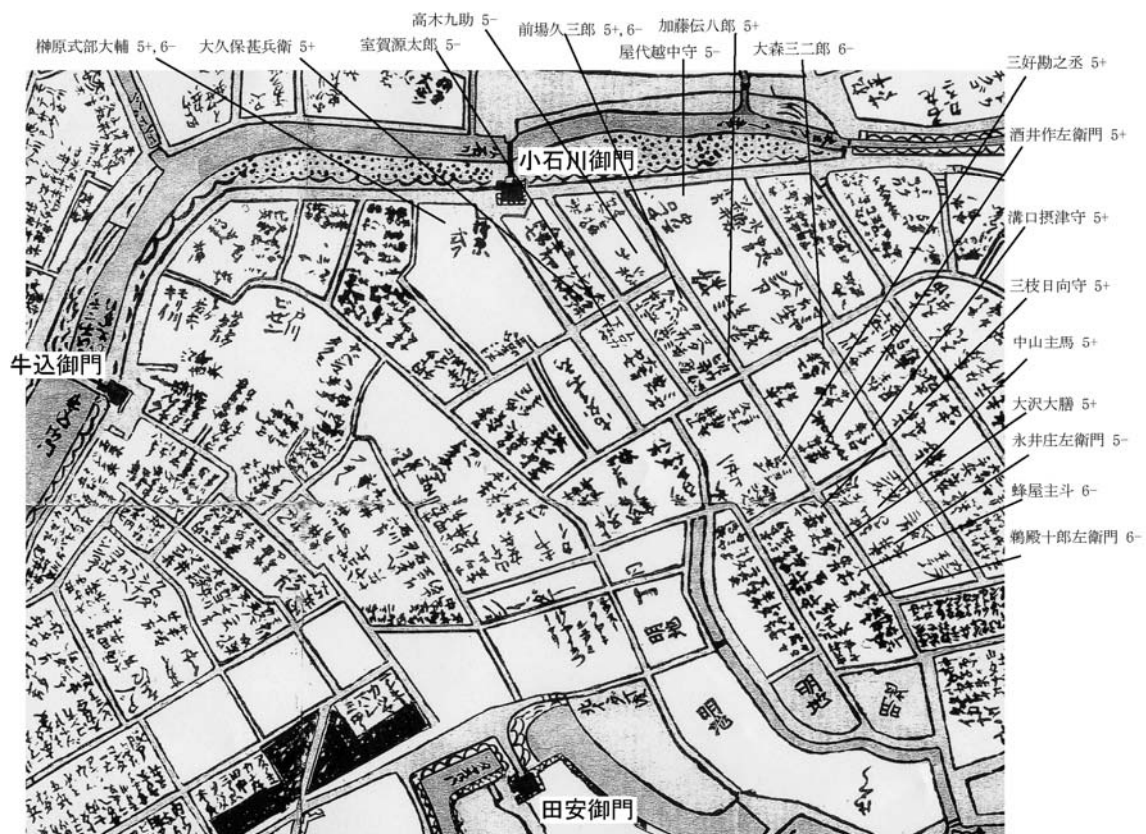


図 1 「改撰江戸大絵図」の江戸城域の北に隣接する地域。この地域は当時多くの大名屋敷が存在した。鶴殿十郎左衛門から屋代越中守にかけての通りは、現在の千代田区専修大学付近から三崎町・水道橋駅までの通りを表す。

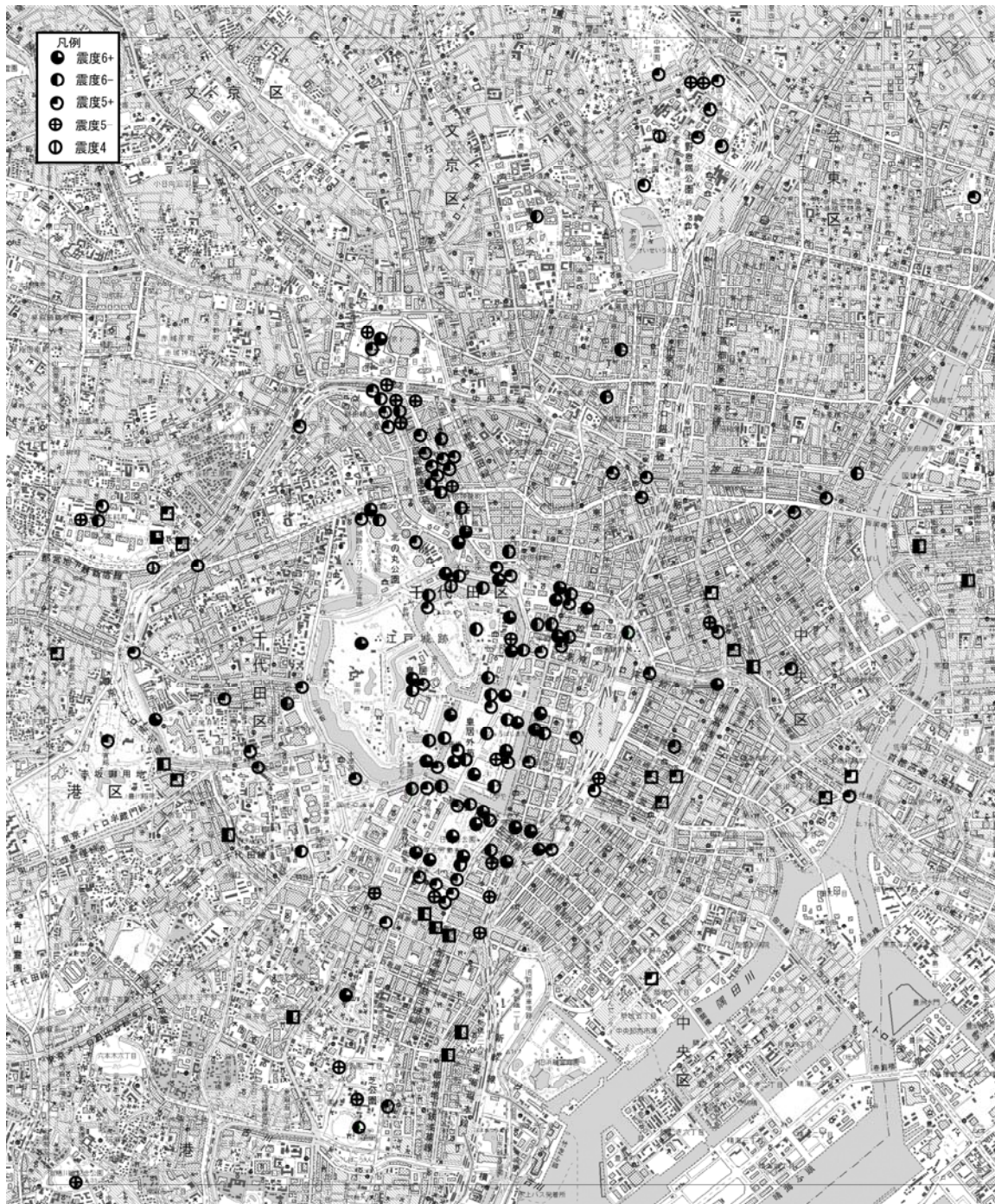


図 2 元禄地震の皇居周辺の震度分布．四角マークでプロットしたものは位置が江戸時代の町名までしか判明しないもので，位置の精度が円でプロットしたものより劣るもの．円でプロットしたものの位置精度は 30m 程度で「ピンポイント震度」，四角でプロットしたものの位置精度は 100～200m 程度で「準ピンポイント震度」を示している．

(2-2) 震度インバージョン解析による短周期地震波の発生域のエネルギー重心とアスペリティの関係

神田 克久（鹿島建設小堀研究室）

武村 雅之（鹿島建設小堀研究室）

(a) 業務の要約

平成 16 年度においては、1923 年大正関東地震および 1703 年元禄地震について、震度インバージョン解析手法を適用して、仮定した断層面における短周期地震波発生域を求めた。平成 17 年度は、これらの短周期地震波発生域の物理的な意味を考察するために、1923 年大正関東地震およびその他の太平洋沿岸の代表的なプレート境界地震の短周期地震波発生域のエネルギー重心と既存の波形インバージョン解析で求められたすべりのアスペリティの位置関係について検討した。

(b) 業務の実施方法

震度分布データを用いたインバージョン手法¹⁾は、震源特性を分析するために有効な手法である。本手法は、現在の気象庁発表の震度情報だけでなく、被害記録に基づいて評価する震度データを用いることによって、機械計測が行われていなかった歴史的な地震まで震源を評価することが可能である。これによって、歴史的に繰り返し発生するプレート境界地震の震源特性を詳細に研究することに威力を発揮してきた。

震度インバージョン解析で得られる震源特性は、震源断層上の周期 1 秒より短い短周期地震波の発生域を示している。ここでは、図 1 に示すように、今までの研究で得られた短周期地震波の発生域のエネルギー重心を求め、波形インバージョン解析で求められているすべりのアスペリティとの位置関係について分析し、断層面で短周期地震波が発生する場所の定性的傾向と破壊過程の関係について考察した。

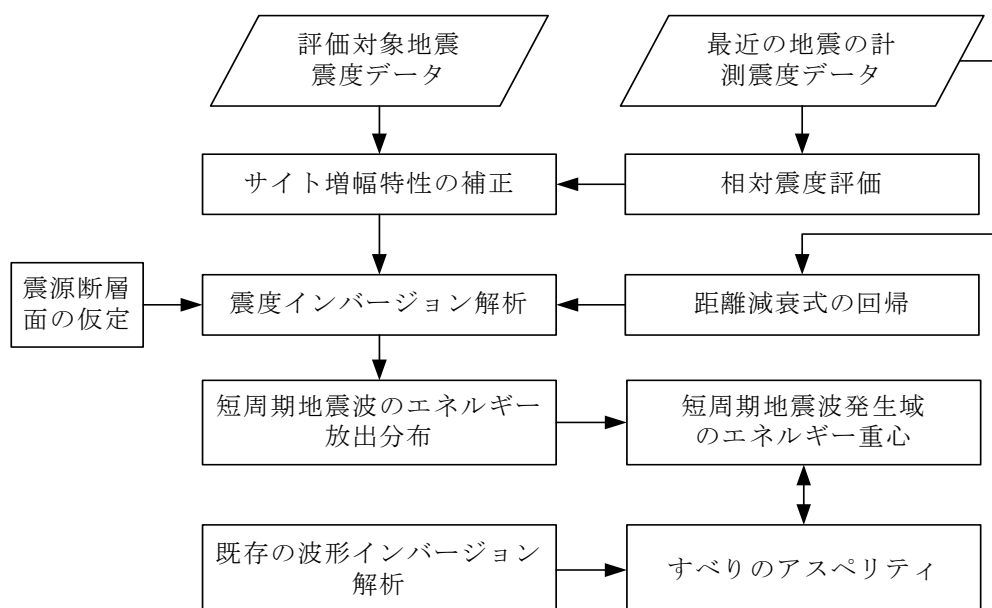


図 1 検討フロー

本業務で用いる震度インバージョン解析とは、設定した震源モデルから各地の震度を評価する解析の逆解析、すなわち震度分布から震源を推定する手法である。震度と震源の関係としては、等価震源距離 X_{eq} ²⁾と震度マグニチュード M_I に関する震度 I の距離減衰式(1)を用いる。(1)式は地域ごとに最近の中小地震を分析して求める。

$$I = -a \log(X_{eq}) + bM_I + c \quad (1)$$

ここで、

$$X_{eq,k}^{-2} = \sum_i (E_{li} / X_{i,k}^2) / \sum_i E_{li} \quad (2)$$

等価震源距離 X_{eq} は、(2)式で示すように震源断層の i 番目の小断層の短周期エネルギー E_{li} の関数となる。ここで、(1)式で評価される震度と観測された震度から各地点における地盤による揺れやすさの影響を除いた値との差を最小となるように、最小自乗法を用いて断層面上の短周期エネルギー E_{li} を求める。

(c) 業務の成果

十勝沖については、1952年3月4日と2003年9月26日にほぼ同じ震源域でM8クラスの地震が発生した。震度インバージョン解析によってこの2つの地震の本震と最大余震の短周期地震波発生域を求めた結果³⁾を図2に示す。1952年および2003年の地震を比較すると、本震および最大余震とも震央位置は極めて近く、震度インバージョン解析の結果である短周期地震波発生域は大部分が重なり、その重心位置はほぼ同じであった。短周期地震波の震源特性については同じ地震の繰り返しであったと考えられる。波形インバージョン解析から得られたすべり分布⁴⁾と短周期地震波発生域の比較を図3に示す。1952年および2003年の地震とも短周期地震波の発生域は、すべりの大きい部分と重なる部分は多いが、そのエネルギー重心はアスペリティの端で破壊の終端部に位置していた。

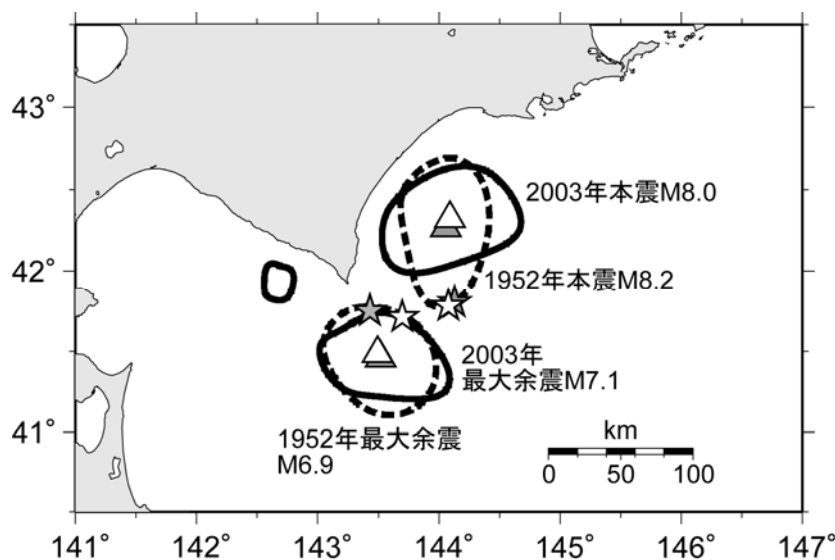


図2 1952年と2003年の十勝沖地震の短周期地震波発生域の比較

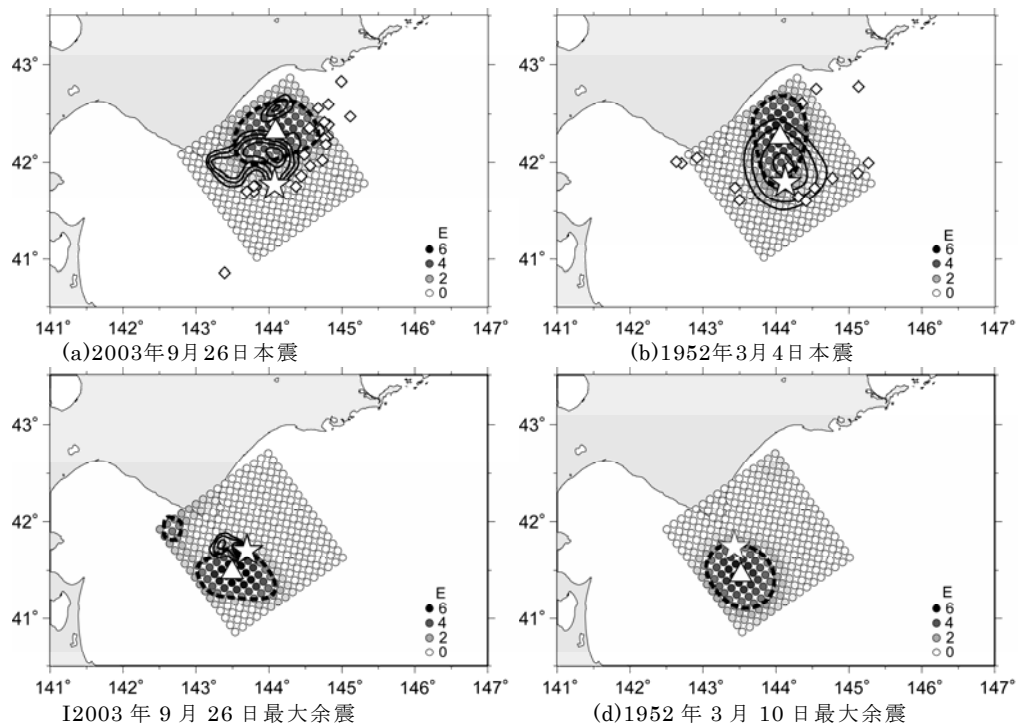


図3 十勝沖地震のインバージョン解析結果、破線は短周期地震波の発生域で、放出エネルギーが全体の70%を占める範囲を示す。実線コンターは山中(2005)によるすべり分布⁴⁾。◇は本震発生後1年間に発生したM5.5以上の地震の震央。△は短周期地震波の発生域のエネルギー重心。☆は震央。

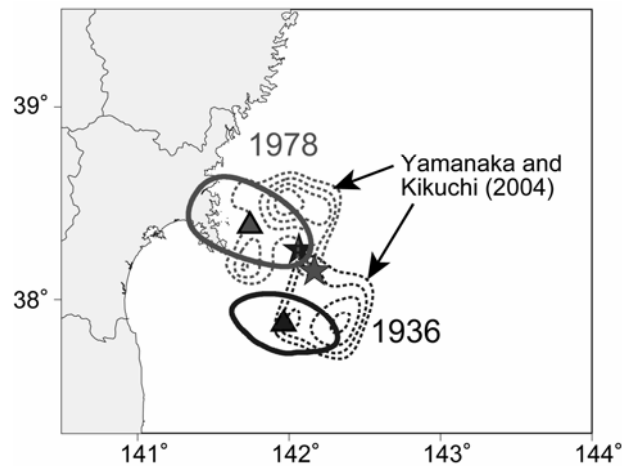


図4 宮城県沖地震のインバージョン解析結果、実線は短周期地震波の発生域で、放出エネルギーが全体の70%を占める範囲を示す。実線コンターはすべり分布⁶⁾。△は短周期地震波の発生域のエネルギー重心。☆は震央。

宮城県沖地震については、1936年11月3日と1978年6月12日にM7.4の地震が発生しており、震度インバージョン解析により短周期地震波発生域を求めた⁵⁾。短周期地震波発生域と波形インバージョン解析により求められているすべりのコンター⁶⁾を比較して図4に示す。図中に▲で示した短周期地震波発生域のエネルギー重心は、1936年の地震がすべりの

大きい領域の南端、1978年の地震がすべりの大きい領域の西端にあった。1936年の地震が南に破壊が進み、1978年が西の陸地方向に破壊が進んだと考え、どちらもアスペリティにおけるすべりの終端部と考えられる領域にあった。

1923年9月1日大正関東地震については、平成16年度報告書で示した震度インバージョン解析の結果を図5に示す。全体の70%のエネルギー領域を白の実線で囲んで示した短周期地震波発生域は、2箇所あり、それぞれの重心位置を△で示す。地殻変動の記録に基づくインバージョン解析⁷⁾を点線で示す。短周期地震波発生域のエネルギー重心は、神奈川県東部の震央近傍と三浦半島の2箇所にあるすべりのアスペリティの東端に位置し、アスペリティのすべりの終端部に対応していることが分かる。

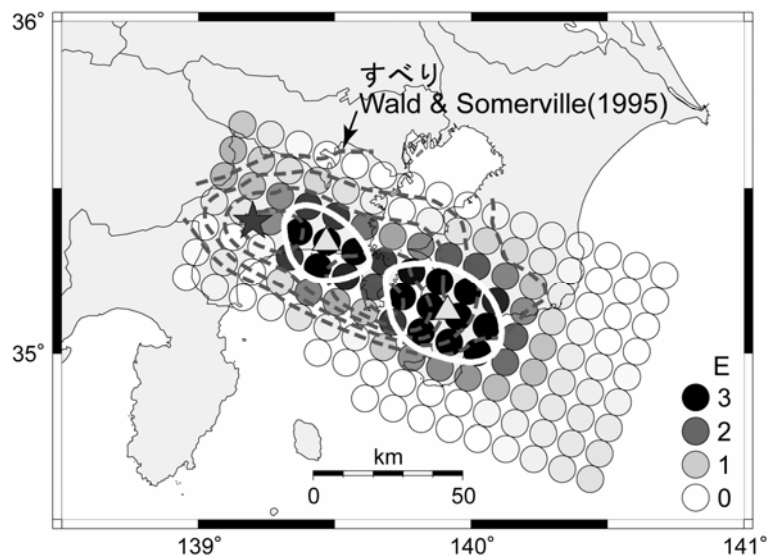


図5 大正関東地震のインバージョン解析結果、白実線は短周期地震波の発生域で、放出エネルギーが全体の70%を占める範囲を示す。実線コンターはすべり分布⁷⁾。△は短周期地震波の発生域のエネルギー重心。☆は震央。

1944年12月7日昭和東南海地震について⁸⁾は、アスペリティを囲むように短周期地震波の発生域が4箇所あり、破壊については、Ichinose et al.(2003)によると和歌山県新宮市沖から海溝寄りを東海方面に進み、伊勢湾入り口付近方向に達したとすると、そのうち2箇所のエネルギー重心は断層破壊の終端部と考えられるアスペリティの北西端に位置していた。1946年12月21日昭和南海地震は、潮岬沖、紀伊水道沖および四国沿岸西部のすべりの大きい領域の近傍の3箇所に短周期地震波の発生域がみられる。破壊が潮岬沖から紀伊水道入り口を通して高知県西部沿岸に進んで、3つイベントがあった¹²⁾とすると、3つのエネルギー重心は全てそれぞれのアスペリティの終端に位置していたことになる。

以上のように、プレート境界大地震の短周期地震波のエネルギー重心については、すべりの大きい領域の破壊の終端部にほとんど位置していた。すなわち、アスペリティのすべりの終点から短周期地震波エネルギーが強く発生している。このような傾向は、1994年三陸はるか沖地震でも短周期地震波エンベロープインバージョンにより確認されている¹³⁾。これらは、**rupture front focusing** と呼ばれ、アスペリティの中で最後に破壊される領域において、破壊が集中しすべり速度が急激に大きくなり、短周期地震動が多く放射される

現象¹⁴⁾と対応すると考えられる。

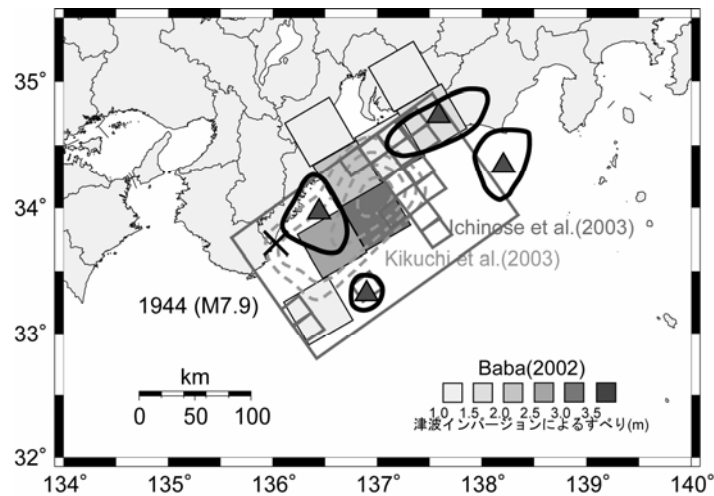


図6 1944年東南海地震のインバージョン解析結果、実線は短周期地震波の発生域で、放出エネルギーが全体の70%を占める範囲を示す。大きな正方形が津波によるすべりの大きい領域⁹⁾。点線コンターは地震波による波形インバージョンすべり分布¹⁰⁾。小さい正方形が地震波による波形インバージョンすべりの大きい領域¹¹⁾。△は短周期地震波の発生域のエネルギー重心。☆は震央。

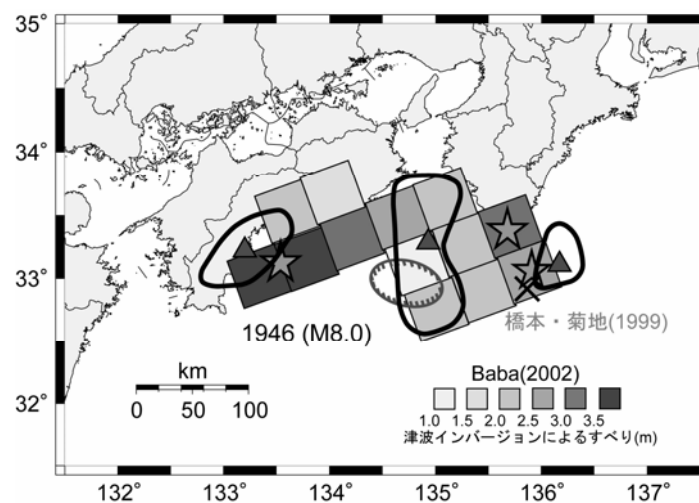


図7 1946年東南海地震のインバージョン解析結果、実線は短周期地震波の発生域で、放出エネルギーが全体の70%を占める範囲を示す。大きな正方形が津波によるすべりの大きい領域⁹⁾。☆印が強震波形のP波およびS波の立ち上がりから推定される震源位置¹²⁾。△は短周期地震波の発生域のエネルギー重心。

(d) 結論ならびに今後の課題

震度インバージョン解析によって得られた1923年大正関東大地震の短周期地震波発生域が、波形インバージョン解析によるすべりのアスペリティとずれていることについて、その他の太平洋沿岸で発生した代表的なプレート境界地震の解析結果を含めて考察した。

1923年大正関東大地震の短周期地震波発生域のエネルギー重心は、すべりのアスペリティの破壊の終端部に当る。この現象は、1952年および2003年十勝沖地震、1936年および1978年宮城県沖地震、1944年東南海地震、および1946年南海地震の短周期地震波発生域でも見られた。これらの現象は、**rupture front focusing** と呼ばれ、アスペリティの中で最後に破壊される領域において、破壊が集中しすべり速度が急激に大きくなり、短周期地震動が多く放射される現象とする理論的な説明¹⁴⁾と対応する。このように破壊過程と短周期地震波の発生域の関係が明らかになれば、機械計測以前の歴史的な地震についても破壊過程が明らかになると期待される。

(e) 引用文献

- 1) 神田克久、武村雅之、宇佐美龍夫：震度データを用いた震源断層からのエネルギー放出分布のインバージョン解析、地震 2、第 56 巻、第 1 号、pp.39-58、2003.
- 2) Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura and M. Takemura: Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, *Tectonophysics*, Vol.218, pp.69-81, 1993.
- 3) 神田克久、武村雅之：十勝沖地震の震度インバージョン解析、月刊地球、特集：巨大地震による長周期地震動とその対応策、海洋出版、2006 年（投稿中）.
- 4) 山中佳子：長周期地震動から見た 2003 年十勝沖地震の震源モデル、月刊地球、号外 49, pp.34-39、2005.
- 5) 神田克久、武村雅之：震度データから検証する宮城県沖で発生する被害地震の繰り返し、地震 2、第 58 巻、第 2 号、pp.177-198、2005.
- 6) Yamanaka, K., and M. Kikuchi, Asperity map along seduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.
- 7) Wald, J.W. and P.G. Somerville: Variable-slip rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.85, No.1, 1995, pp.159-177.
- 8) 神田克久、武村雅之、宇佐美龍夫：震度インバージョン解析による南海トラフ巨大地震の短周期地震波発生域、地震 2、第 57 巻、第 2 号、pp.153-170、2004.
- 9) Baba, T: Slip distributions of the 1944 Tonankai and 1946 Nankai earthquakes estimated from tsunami inversion using a new plate model, Doctor thesis of Kanazawa Univ., Japan, 58pp., 2002.
- 10) Kikuchi, M., M. Nakamura and K. Yoshikawa: Source rupture processes of the 1944 Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms, *Earth Planets Space*, 55, 4, 159-172, 2003.
- 11) Ichinose, G.A., H.K. Thio, P.G. Somerville, T. Sato and T. Ishii: Rupture process of the 1944 Tonankai earthquake (Ms8.1) from the inversion of teleseismic and regional seismograms, *J. Geophys. Res.*, 108, B10, doi:10.1029/2003JB002393, 2003.
- 12) 橋本徹夫・菊地正幸, 1999, 地震記象から見た 1946 年南海地震の震源過程, 月刊地球号外, 24, 16-20.

- 13) Nakahara, H., T. Nishimura, H. Sato and M. Ohtake: Seismogram envelope inversion for the spatial distribution of high-frequency energy radiation from the earthquake fault: Application to the 1994 far east off Sanriku earthquake, Japan, J. Geophys. Res., 103, B1, 1998, pp.855-867.
- 14) 加藤尚之：アスペリティ破壊の終端域での短周期地震波発生メカニズムについて、日本地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集、2006 年 5 月。

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
神田克久、 武村雅之	歴史的な地震に対する震度データの活用と問題点	日本地震工学会・大会－ 2005	平成 17 年 11 月 21 日
神田克久、 武村雅之	2005 年 8 月 16 日宮城県沖の地震は何者か？－震度インバージョンに基づく過去の宮城県沖地震との比較	日本地震学会 2005 年度秋季大会	平成 17 年 10 月 20 日

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(2-3) 震度・史料データと対応する震度を用いた地震動強さの面的分布の予測

境 有紀（筑波大学大学院システム情報工学研究科）

大月俊典（筑波大学大学院システム情報工学研究科）

額 額 一起（東京大学地震研究所）

(a) 業務の要約

歴史地震史料における震度に対応するように開発した算定法による震度を対象として、表層地盤の増幅特性、距離減衰を考慮に入れた地震動強さの面的分布を求める地震被害予測プログラムの開発を行い、実際の地震被害との対応性について検証した。

歴史地震史料、あるいは、現代の被害地震で強震記録が回収された場合についても強震記録、あるいは、地震動強さが把握できる地点は限られる。昨年度、強震観測記録を基に空間補間を行って地震動強さの面的分布を求めるプログラムを開発したが、例えば、1995年兵庫県南部地震の震災の帯のように、数 km の範囲で地震動強さが急激に変化するような場合は強震観測点の密度が不足、十分な精度で地震動強さの面的分布を再現することができなかった。そこで、ここでは 1km メッシュの表層地盤データを用いてよりきめ細かい地震動強さの面的分布を求めるプログラムの開発を行う。

(b) 業務の実施方法

まず、表層地盤の非線形増幅特性を簡便に評価する方法の開発を行う。既に開発した方法¹⁾に対して、表層地盤の等価剛性、等価粘性モデルを最新の研究成果に基づいたモデルに修正し、更に、任意の工学的基盤レベルを対象とできるように適用範囲を拡張する。そして、表層地盤の増幅特性と距離減衰を考慮に入れ、歴史地震史料における震度に対応した地震動強さの面的分布を予測するプログラムの開発を行う。最後に開発したプログラムを用いて強震記録がほとんど回収されなかった 2003 年宮城県北部地震を対象として地震動強さを計算し、実際の被害との対応性について検証する。

(c) 業務の成果

1) 表層地盤の非線形増幅特性を簡便に評価する方法の開発

表層地盤の増幅特性を評価する簡便式を参考文献¹⁾と同様に導く。ここで、土の非線形性を表すモデルが土の非線形性モデルを最新の研究成果²⁾のものに置き換えて等価線形地震応答解析³⁾を行い、得られた地表スペクトルに簡便式で求めた地表スペクトルの結果が整合することを目標とする。具体的な手順を以下に示す。

①改正建築基準法の告示で規定された解放工学的基盤のスペクトル（以下、告示スペクトル）にフィットするように解放工学的基盤波を位相ランダムで 10 波作成する。解放工学的基盤でのレベルは、稀に発生する地震動（以下、中地震動）と極めて稀に発生する地震動（以下、大地震動）の 2 レベルを対象とする。大地震動の場合の波形の例を図 1 に、基盤動の弾性加速度応答スペクトルを図 2 に示す。

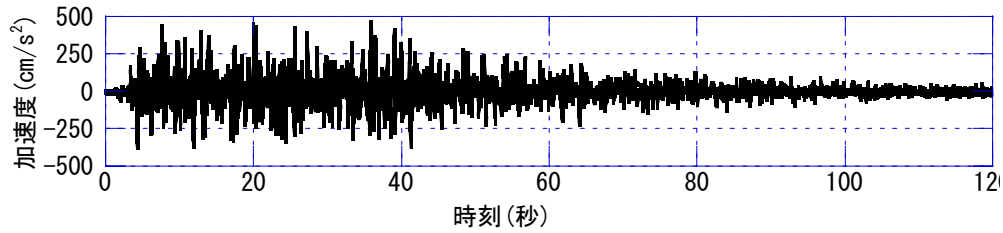


図1 解放工学的基盤波の波形例（大地震動）

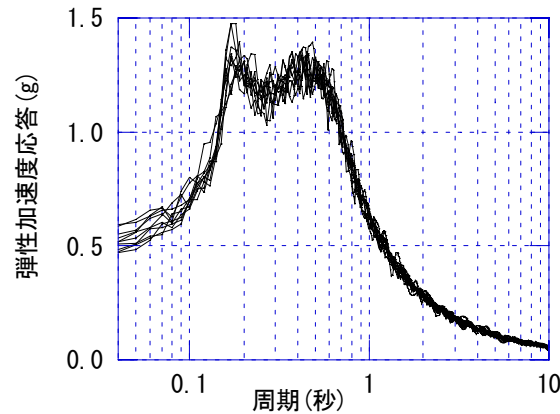


図2 告示の解放工学的基盤スペクトルとこれにフィットするように作成した基盤動の弾性加速度応答スペクトル（減衰定数5%、大地震動）

②式(1)(2)に示すインピーダンス比 α 、等価 1 次周期 T_1 (秒)で表現するパラメタを用いて表層地盤の特性を表現する。表層地盤の縮約は、表層 30mを一層（ただし工学的基盤まで 30m 以下の場合は表層全体とした）に置換した。表層 30mを一層としたのは、表層地盤の増幅特性が、より表層に近い部分の影響が大きいことおよび、表層地盤の増幅率を推定するのに表層 30mの平均せん断波速度が有効であることが指摘されているため¹⁾である。

$$\alpha = \rho_e V_{se} / \rho_b V_{sb} \quad (1)$$

$$T_1 = 4H / V_{se} \quad (2)$$

$$V_{se} = (\sum V_{si} d_i) / H \quad (3)$$

$$\rho_e = (\sum \rho_i d_i) / H \quad (4)$$

ここで、 ρ_i : 表層地盤の各層の単位体積重量(tf/m³) ρ_b : 工学的基盤の単位体積重量(tf/m³)、 V_{sb} :工学的地盤のせん断波速度(m/s)、 H : 表層地盤全体の厚さ(m)、 V_{si} : 表層地盤各層のせん断波速度(m/s)、 d_i : 表層地盤の各層の層厚(m)である。

③地震応答解析で使用する土の非線形モデルの設定を行う。参考文献¹⁾では、土の非線形モデルに大崎・原モデル（以下、告示モデル）を使用しているが、せん断歪に対する減衰を過大に評価していることが指摘されていた。そこで、古山田らにより新しく提案されているモデル²⁾（以下、古山田モデル）を用いて等価線形地震応答解析³⁾を行った。告示、古山田のそれぞれのモデルのせん断歪と減衰定数の関係を図 3 に、せん断歪とせん断剛性比の関係を図 4 示す。

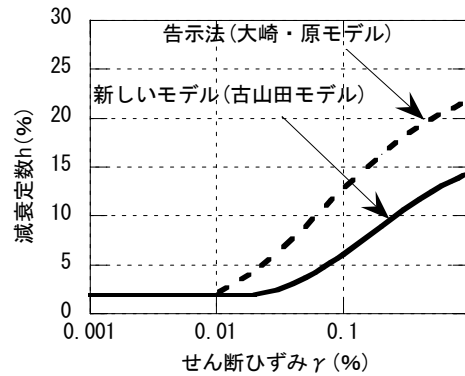


図3 せん断ひずみと関係減衰定数の関係²⁾

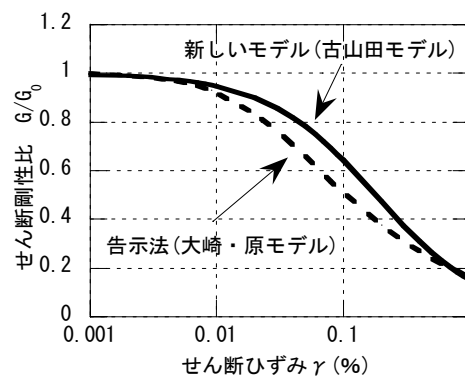


図4 せん断ひずみとせん断剛性の関係²⁾

④日本全国の様々な特徴をもつ表層地盤の一次元表層地盤モデルに対して地震応答解析を行い、それぞれの表層地盤での地表スペクトルを求める。基盤動が10波に対する各一次元表層地盤モデルでの地表スペクトル10波の平均を取り、その平均値の地表スペクトルに対して式(5)による当てはめを行い、地表スペクトルをパラメタA、 T_c 、d、 f_A 、bで表現する。式(5)は荷重指針⁴⁾の式をもとにしているが、長周期における当てはめの精度を上げるため、変位一定領域 ($bT_c \leq T$) を加えたもの¹⁾である。

$$S_A = \begin{cases} \left(1 + \frac{f_A - 1}{d} \frac{T}{T_c}\right) A & , T \leq T_c \\ f_A A & , dT_c \leq T \leq T_c \\ f_A \frac{T_c}{T} A & , T_c \leq T \leq T_c \\ f_A \frac{bT_c^2}{T^2} A & , bT_c \leq T \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 S_A :弾性加速度スペクトル (減衰定数 5%、G)、T:周期(秒)、A:地動最大加速度 (G)、 T_c :コーナー周期(秒)、d、 f_A 、b:スペクトルの形状を表現するパラメタである。各パラメタとスペクトルの関係を図5に示す。告示スペクトルは式(5)で $A=320, 64(\text{cm/s}^2)$ (それぞれ大、中地震動)、 $T_c=0.64$ (秒)、 $d=0.25$ 、 $f_A=2.5$ 、 $b=\infty$ とおいた場合に相当する。

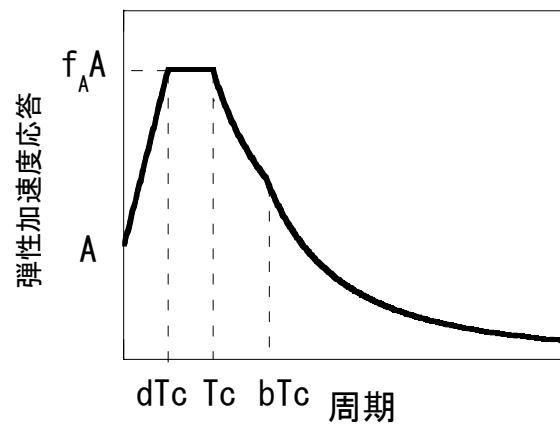


図5 各パラメタとスペクトルの関係

当てはめは、パラメタ A 、 T_c 、 d 、 f_A 、 b を変化させて、地震応答解析による地表スペクトル(図 6)との誤差率(式(6))の周期 0.5～3.0 秒における平均値を求め、その平均値が最小になるように行った。

$$d_r = \frac{|S_A - S_e|}{S_e} \quad (6)$$

ここで、 S_A ：式(5)による弾性加速度スペクトル、 S_e ：地震応答解析による地表スペクトルである。

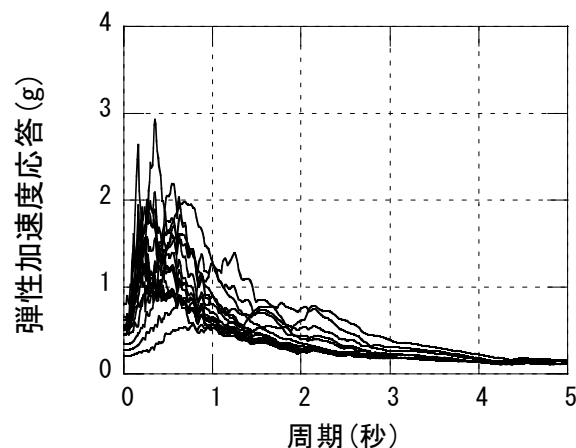


図6 地震応答解析で求めた地表の弾性加速度
応答スペクトル (減衰定数5%、大地震動)

⑤重回帰解析を行い、地表スペクトルを表現するパラメタ A 、 T_c 、 d 、 f_A 、 b と表層地盤のパラメタ α 、 T_1 との相関性について調べる。そして、地表スペクトルを表現するパラメタ A 、 T_c 、 d 、 f_A 、 b を表層地盤のパラメタ α 、 T_1 の式として表現する。

重回帰解析の結果、地表スペクトルを表現するパラメタのうち A 、 T_c は、表層地盤のパラメタ α 、 T_1 と強い相関性が見られた。よって A 、 T_c をそれぞれ α 、 T_1 の回帰式として表現した。得られた回帰式を式(7)-(10)に、大地震動の場合を例として A 、 T_c それぞれの、回帰式による値と地震応答解析の値との対応を図 7、図 8 に示す。

大地震動

$$A = -0.38\alpha - 0.51T_1 + 0.90 \quad (7)$$

$$T_c = -0.25\alpha + 1.65T_1 + 0.25 \quad (8)$$

中地震動

$$A = -0.080\alpha - 0.062T_1 + 0.17 \quad (9)$$

$$T_c = -0.016\alpha + 0.73T_1 + 0.33 \quad (10)$$

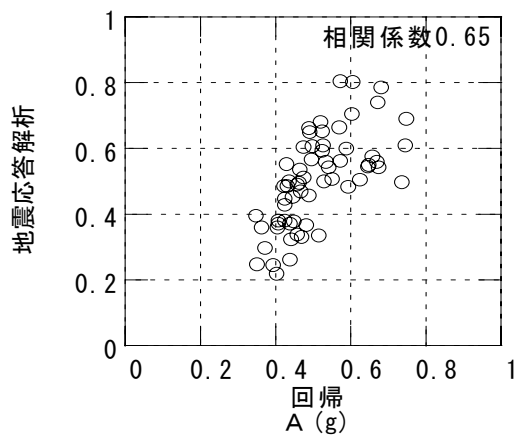


図7 地動最大加速度Aの地震応答解析と回帰解析結果の対応(大地震動)

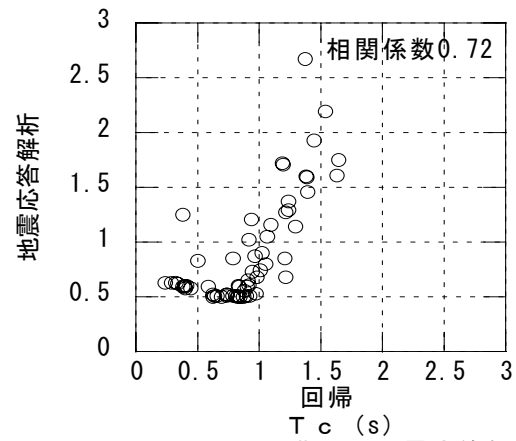


図8 コーナー周期 T_c の地震応答解析と回帰解析結果の対応(大地震動)

一方、地表スペクトルを表現するパラメタのうち d 、 f_A 、 b は表層地盤のパラメタとは強い相関性は見られなかったため、表層地盤によらず一定値とした。その値については、評価式が地表スペクトルをできるだけ包絡するように f_A の値を平均値からやや割り増し、最終的なパラメタ d 、 f_A 、 b の値を $d=0.49$ 、 $f_A=2.4$ 、 $b=3.2$ （大地震動）、 $d=0.6$ 、 $f_A=2.8$ 、 $b=2.2$ （中地震動）とした。また、告示法の最小規定（地表スペクトルが式(11)(12)で示される S_N を下回る場合は $S_A=S_N$ とする）をやや簡略化して適用した。即ち、 S_A が式(13)で示される告示スペクトルの1.2倍（大地震動）あるいは1.5倍（中地震動）を下回る場合はこの値とした。

$$S_N = \begin{cases} 1.2S_K & , T \leq 1.2T_1 \\ 1.0S_K & , 1.2T_1 < T \end{cases} \quad (\text{大地震動}) \quad (11)$$

$$S_N = \begin{cases} 1.5S_K & , T \leq 1.2T_1 \\ 1.35S_K & , 1.2T_1 < T \end{cases} \quad (\text{中地震動}) \quad (12)$$

$$S_K = \begin{cases} (0.64 + 6T)F & T < 0.16 \\ 1.6F & 0.16 \leq T < 0.64 \\ \frac{1.024F}{T} & 0.64 \leq T \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 S_k : 告示に示された解放工学的基板上面の加速度応答スペクトル(G)、T: 周期(秒)、 T_1 : 表層地盤の等価 1 次周期(秒)、 $F=1/g$ (中地震動)、 $5/g$ (大地震動)、 g : 重力加速度(cm/s^2)である。よって、地表スペクトルを得るには、表層 30m のデータから式(1)(2)(3)(4)により大地震、中地震それぞれの A と T_c を求めて、これらと d 、 f_A 、 b の値を式(5)に代入すれば良い。大地震の場合を例として、表層地盤モデルについて土の非線形モデルごとの地震応答解析結果を図 9 に示す。

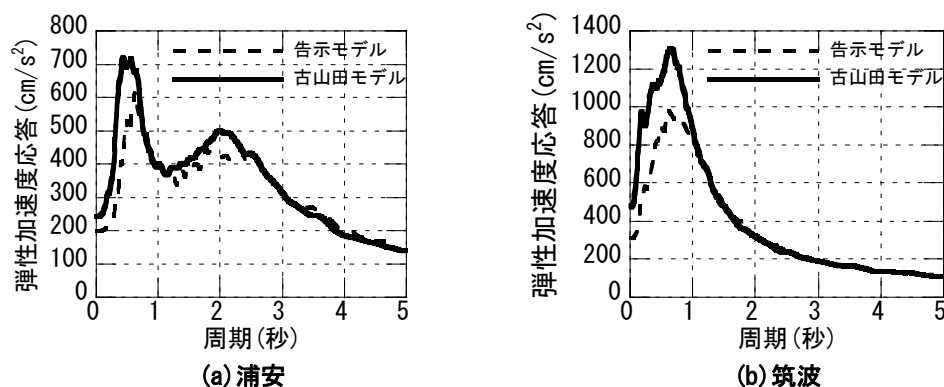


図9 等価剛性、等価減衰モデルの違いによる地震応答解析結果の違い

土の非線形モデルを変更したことにより卓越周期が短周期側へ移動し、その付近での加速度が大きくなっている。ここで提案する簡便法、告示に示された精算法（告示法）による地表スペクトルと地震応答解析の結果の比較を図 10 に示す。簡便法が地震応答解析をよりの確に表現していることがわかる。

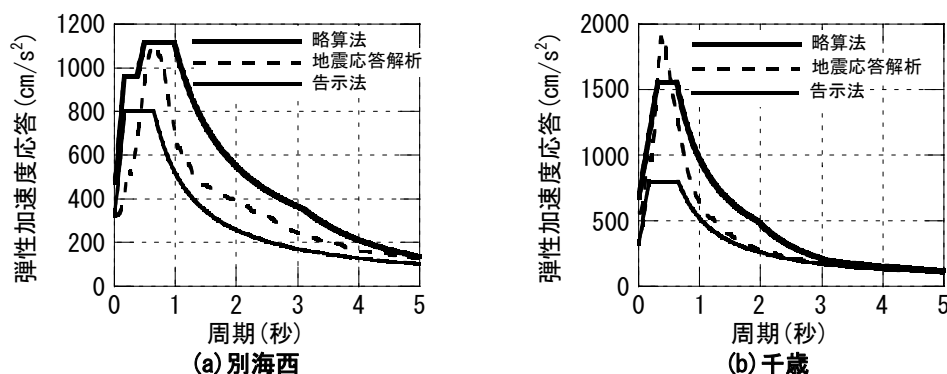


図10 略算法、告示法、地震応答解析による地表スペクトルの比較

2) 地震動強さの面的分布の作成

1) で開発した表層地盤の増幅特性を簡便に評価する方法を用い、更に、距離減衰を考慮に入れて地震動強さの面的分布を求めるプログラムを開発した。地震動強さ指標として、建物被害と相関が高い応答スペクトルの 1-2 秒平均値から求める震度⁵⁾ (以下、1-2 秒震度)を採用した。そして 2003 年宮城県北部地震を対象として、1-2 秒震度と実際の被害を比較することにより、開発したプログラムによる地震動強さの面的分布の妥当性を検証した。歴史地震史料や強震記録が一部しか回収されない場合のように必要な情報が限られること

を想定し、表層地盤の増幅特性、距離減衰を考慮に入れない場合についても検討した。地震動強さの面的分布を求める際の条件による場合分けを表 1 に示す。

表 1 地震動強さの面的分布を求める際の条件による場合分け

		表層地盤考慮なし	表層地盤考慮	
			周期変化考慮なし	周期変化考慮
距離減衰考慮なし		a	d	g
距離減衰考慮	キャリブレーションなし	b	e	h
	キャリブレーションあり	c	f	i

表層地盤の増幅特性も距離減衰も考慮しない場合（方法 a）は、2003 年宮城県北部地震のように限られた強震観測点しか波形が回収されず、震度計によって震度、地動最大加速度の値のみがわかっている場合を想定している。2003 年宮城県北部地震では用いる波形データを JMA 涌谷の強震記録とした。この記録から地表最大加速度と 1-2 秒震度の関係を求める（式(14)）。

$$I_{1-2} = 1.9 \log PGA \quad (14)$$

ここで、 I_{1-2} :1-2 秒震度、PGA:地表最大加速度(cm/s^2)である。そして、各観測点の地動最大加速度の値からその地点における 1-2 秒震度を求める。この方法は、応答スペクトルの形状が全ての観測点で同じと仮定し、その振幅レベルを地動最大加速度によって考慮に入れて、被害と対応する 1-2 秒震度を求めていることになる。従って、1-2 秒震度が求まるのは、震度計が設置されている観測点位置のみである。

表層地盤の増幅特性を考慮する場合（d～i）は、1)で開発した簡便評価法を用いる。表層地盤の特性を決めるパラメタ α 、 T_1 を決める表層 30mのせん断波速度 V_{se} は、防災科学技術研究所による地震ハザードステーションJ-SHIS⁶⁾（以下、J-SHIS）のデータを利用した。これは、国土数値情報の地形分類と地盤の平均S波速度の関係から、日本全国を 1kmのメッシュで区分し、各メッシュに対して表層 30mの平均せん断波速度を求めたもの⁷⁾である。その他のパラメータの値は、 $\rho_e=1.75$ 、 $\rho_b=2.0$ 、 $V_{sb}=700$ とした⁸⁾。これらの値から求めた α 、 T_1 により、大地震動、中地震動それぞれの A 、 T_c を導く。大地震と中地震の基盤動レベル（大地震動の場合をレベル 5、中地震動の場合をレベル 1 とする）以外の基盤動レベルでの A 、 T_c の推定は、大地震、中地震の基盤動レベルに線形な関係があると仮定して、基盤動レベルと A 、 T_c の値の関係を各地点について求める。

まず距離減衰を考慮しない場合（方法d, g）は、回収された強震記録を基に、その地点での基盤動レベルと A の値の関係から基盤レベルを求め、工学的基盤の A 、 T_c を求める。その際、式(7)～(10)は、基盤スペクトルの A 、 T_c （大地震動: $A=320\text{cm/s}^2$ 、 $T_c=0.64\text{s}$ 、中地震動: $A=64\text{cm/s}^2$ 、 $T_c=0.64\text{s}$ ）からの増幅度を表現するものに拡張して適用する。

2003 年宮城県北部地震の場合は、JMA涌谷の地表スペクトル（図 11）の当てはめの結果より $A=575(\text{cm/s}^2)$ 、 $T_c=0.51$ となり、涌谷における基盤動レベルと A の値の関係（図 12）から基盤動レベルを求めると 5.85 となった。よって、基盤動レベルと T_c の関係（図 13）から基盤スペクトルの T_c が求まる。そして、求めた基盤スペクトルの A 、 T_c 各地点の基盤動レベルと A 、 T_c の関係から各地点の A 、 T_c が求まり 1-2 秒震度が決まる（方法g）。また、基盤から地表への T_c の増幅を考慮しない場合、即ち、 A のみが増幅する場合（方法d）に

についても検討を行った。

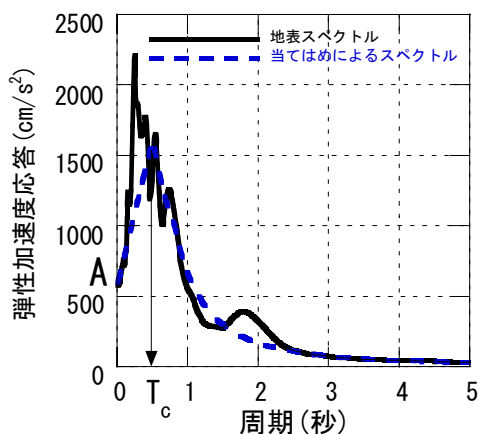


図 11 地表スペクトルの当てはめ (JMA 涌谷)

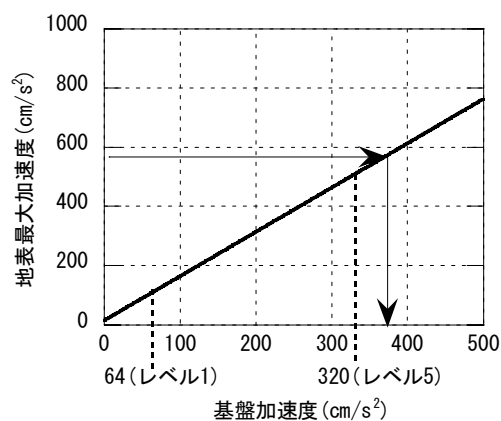


図 12 基盤加速度レベルと地表地動最大加速度の関係 (JMA 涌谷)

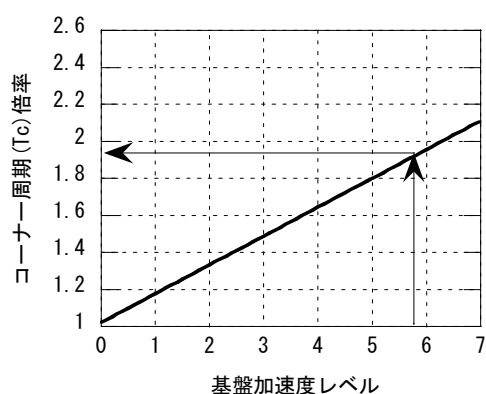


図 13 基盤加速度レベルとコーナー周期の増幅倍率の関係 (JMA 涌谷)

距離減衰を考慮に入れてキャリブレーションを行わない場合 (方法e, h) は、マグニチュードと震源距離から工学的基盤の地動最大加速度とレベルを求め、方法d, gと同様に各点の 1-2 秒震度を求める。距離減衰式は、司・翠川⁹⁾によるものを用いた。

$$\log A = b - \log X - kX \quad (15)$$

ここで、A:地表最大加速度(cm/s^2)、b:モーメントマグニチュード M_W と震源深さで決まる係数、X:等価震源距離(km)である。ただし、Aは解放工学的基盤での最大加速度を1.4倍したものを地表最大加速度としているため、解放工学的基盤での最大加速度（以下、基盤での最大加速度）は、式(15)で求めたAを1.4で割った値とした。ここでは簡単のため等価震源距離は、気象庁発表の震源の位置をすべり量が最大になる位置とみなした。このことは、地震発生直後に気象庁からマグニチュードと震源位置が発表されれば、この方法で簡便に地震動強さの面的分布を求めることができることになる。

更に、回収された強震記録の情報から距離減衰式全体のレベルをキャリブレーションする場合（方法 f, i、図 14）についても検討した。また方法 a に対して、距離減衰を考慮する場合（方法 b, c）についても検討を行った。

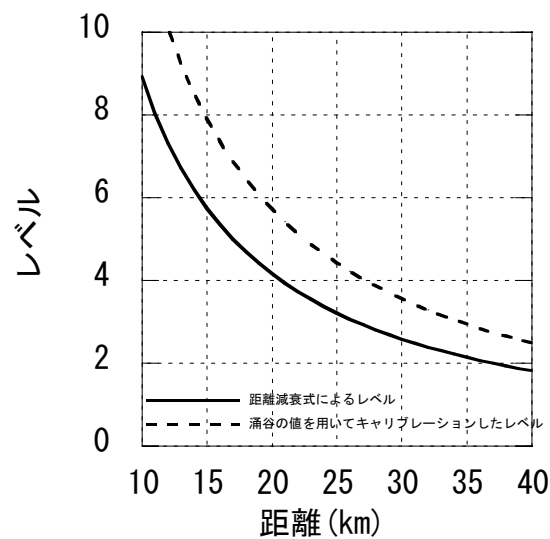


図 14 距離減衰式のキャリブレーション

各強震観測点について、観測点周辺の被害から求めた震度と本手法で求めた 1-2 秒震度、計測震度と比較して表 2 に示す。いずれの場合も計測震度より実際の被害と対応していること、情報が少ない場合、評価方法が簡便な場合でも精度が高いものがあることがわかる。

表2 各方法による震度と実際に被害から求めた震度との対応

観測点名	実際の被害から求めた震度	計測震度				方法a			方法b			方法c			方法d		
			誤差				誤差			誤差			誤差			誤差	
矢本町	5.75	6.20	0.45	○	5.57	-0.18	◎	5.32	-0.43	○	5.66	-0.09	◎	5.24	-0.51	△	
鳴瀬町	5.25	6.00	0.75	△	5.47	0.22	○	5.36	0.11	◎	5.70	0.45	○	5.32	0.07	◎	
南郷町	5.25	6.00	0.75	△	5.11	-0.14	◎	5.13	-0.12	◎	5.47	0.22	○	5.28	0.03	◎	
涌谷町	5.25	5.80	0.55	△	5.21	-0.04	◎	4.90	-0.35	○	5.24	-0.01	◎	5.24	-0.01	◎	
河南町	5.25	5.70	0.45	○	4.80	-0.45	○	5.07	-0.18	◎	5.41	0.16	◎	5.33	0.08	◎	
鹿島台町	5.25	5.90	0.65	△	6.09	0.84	×	5.09	-0.16	◎	5.43	0.18	◎	5.33	0.08	◎	
小牛田町	4.75	5.50	0.75	△	5.26	0.51	△	4.84	0.09	◎	5.18	0.43	○	5.28	0.53	△	
桃生町	4.75	5.50	0.75	△	4.91	0.16	◎	4.70	-0.05	◎	5.04	0.29	○	5.28	0.53	△	
誤差絶対値平均		0.64	△		0.32	○		0.19	◎		0.23	○		0.23	○		

観測点名	方法e			方法f			方法g			方法h			方法i		
		誤差			誤差			誤差			誤差			誤差	
矢本町	5.39	-0.36	○	5.65	-0.10	◎	5.48	-0.27	○	5.74	-0.01	◎	6.18	0.43	○
鳴瀬町	5.51	0.26	○	5.78	0.53	△	4.28	-0.97	×	4.53	-0.72	△	4.87	-0.38	○
南郷町	5.24	-0.01	◎	5.50	0.25	○	5.37	0.12	◎	5.30	0.05	◎	5.75	0.50	○
涌谷町	4.99	-0.26	○	5.24	-0.01	◎	5.48	0.23	○	5.04	-0.21	○	5.48	0.23	○
河南町	5.23	-0.02	◎	5.49	0.24	○	4.58	-0.67	△	4.44	-0.81	×	4.82	-0.43	○
鹿島台町	5.25	0.00	◎	5.51	0.26	○	5.00	-0.25	○	4.87	-0.38	○	5.32	0.07	◎
小牛田町	4.96	0.21	○	5.21	0.46	○	5.38	0.63	△	4.83	0.08	◎	5.27	0.52	△
桃生町	4.83	0.08	◎	5.08	0.33	○	5.37	0.62	△	4.59	-0.16	◎	5.02	0.27	○
誤差絶対値平均		0.15	◎	0.27	○		0.47	○		0.30	○		0.35	○	

※ 記号は誤差の絶対値の大きさを表す ◎:0~0.20 ○:0.21~0.50 △:0.51~0.80 ×:0.81~

最後に、2003 年宮城県北部地震を対象として地震動強さの面的分布を描き、源栄ら¹⁰⁾によるアンケート震度による震度分布との比較を行った。アンケート震度は、1-2 震度の値と直接対応するものではないが、地震動強さの分布の対応性を比較することはできる。

求めた地震動強さの面的分布を図 15 に、源栄らによるアンケート震度の分布図を図 16 に示す。参考までに、表層 30mの平均せん断波速度 V_{se} の面的分布を図 17 に示す。表層地盤の増幅特性をより綿密に考慮に入れたものがアンケート震度分布のきめ細かい分布と対応していることがわかる。

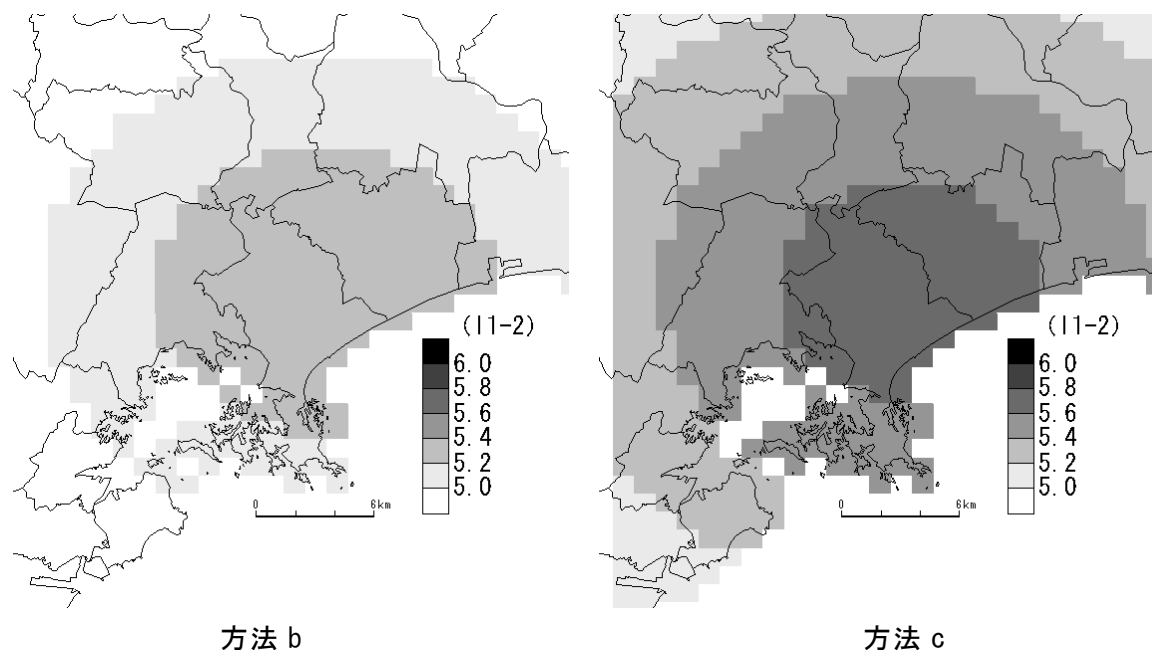
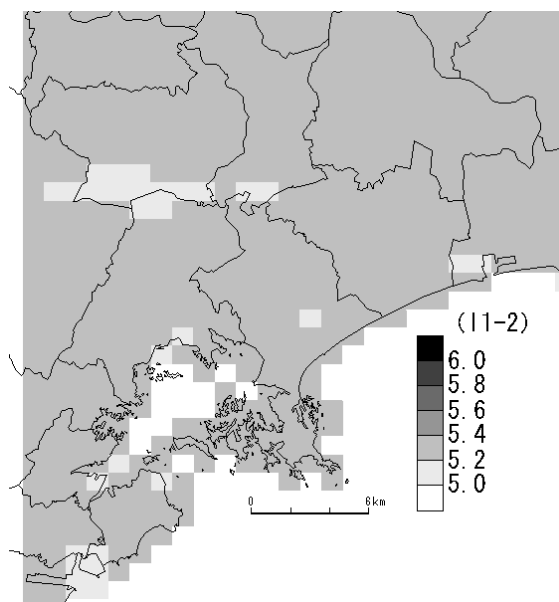
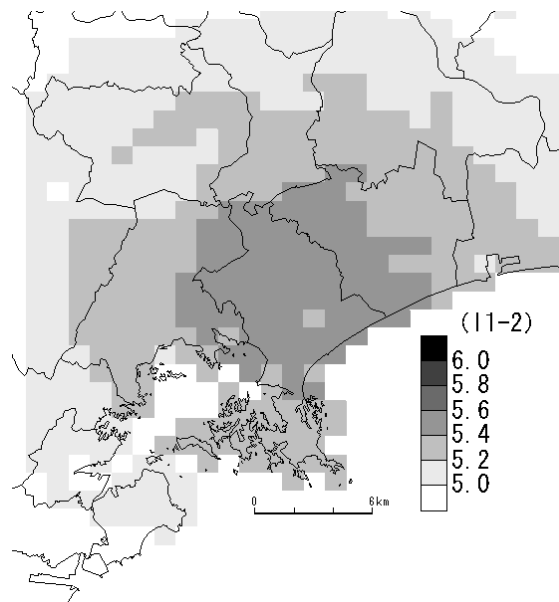


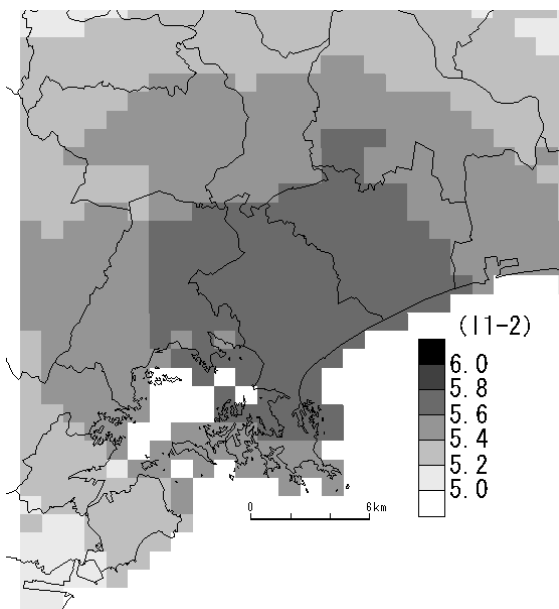
図 15 [1] 地震動強さの面的分布



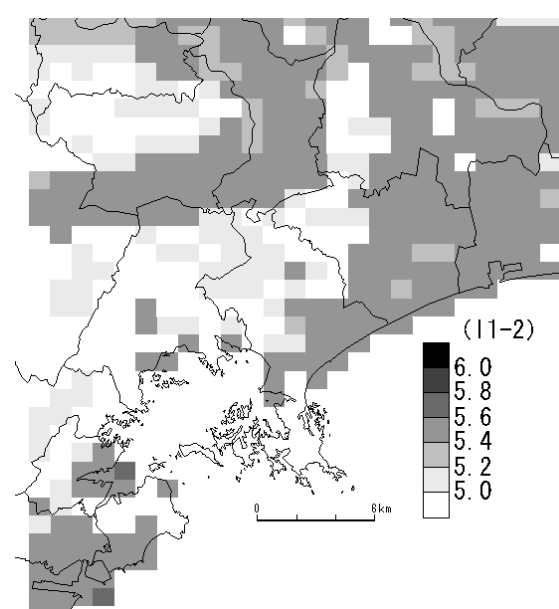
方法 d



方法 e

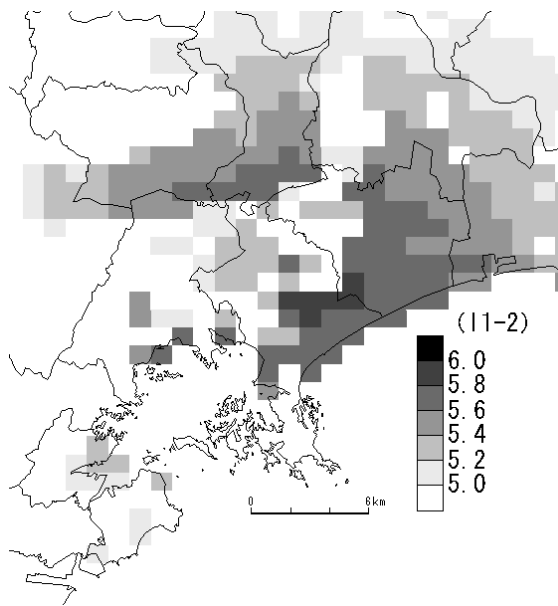


方法 f

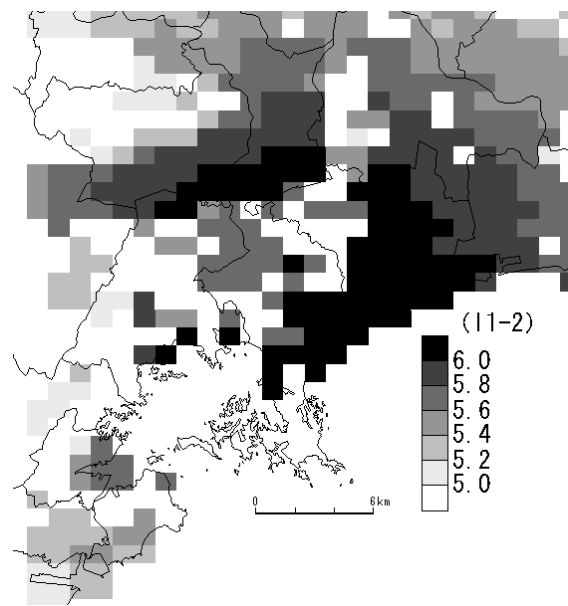


方法 g

図 15 [2] 地震動強さの面的分布



方法 h



方法 i

図 15 [3] 地震動強さの面的分布

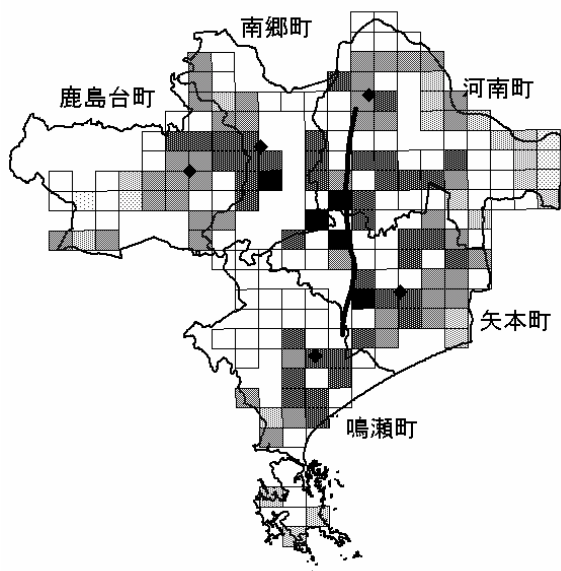


図 16 源栄⁹⁾によるアンケート震度分布

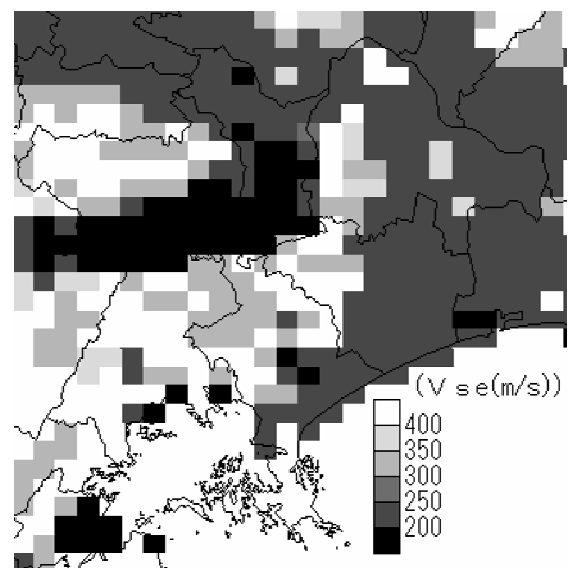


図 17 V_{se} の面的分布

(d) 結論

簡便に表層地盤増幅特性の非線形性を評価して地表スペクトルを簡便に表現する式を導き、歴史地震史料における震度に対応した地震動強さの面的分布を求める方法について検討した。表層 30m のデータをもとにして表層地盤の非線形性を考慮した地表スペクトルを簡便に表現する式を導き、基盤動レベルの地震動強さの距離減衰を考慮することで、実際の被害から求めた震度に近い地震動強さの面的分布を得ることができた。この方法は震源に関するデータがあれば、表層地盤の特性を表現する表層 30m のデータを式に代入するだけで簡便に地震動強さと周期特性の面的分布を求めることができるもので、被害と対応した地震動強さを再現する方法としても有効である。

(e) 引用文献

- 1)境有紀,津野靖士,工藤一嘉,壁谷澤寿海:改正建築基準法の解放工学的基盤波を想定した表層地盤増幅特性の簡便評価法,日本建築学会構造系論文集,第 565 号,73-78,2003.3.
- 2)古山田耕司:土の非線形モデルが地盤の応答評価に与える影響,第 32 回地盤震動シンポジウム(2004)
- 3)吉田望,末富岩雄,DYNEQ・等価線形法に基づく水平成層基盤の地震応答解析プログラム,佐藤工業(株)技術研究所報,61-70,1996
- 4)日本建築学会,建築物荷重指針・同解説,1993.6.
- 5)境有紀,神野達夫,瀬瀬一起:震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案,日本建築学会構造系論文集,第 585 号,71-76,2004.
- 6)防災科学研究所,地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp>
- 7)藤本一雄,翠川三郎:日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定,日本地震工学会論文集,第 3 巻,第 3 号,2003
- 8)宮城県:第三次地震被害想定調査報告書、<http://www.pref.miyagi.jp/kikitaishaku/3higaishin/sanzihigaitop.htm>, 2004.
- 9)司宏俊,翠川三郎:断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式:日本建築学会構造系論文集,第 523 号,63-70,1999.9.
- 10)源栄正人,大野晋,佐藤健,落合衛,真鍋俊平:2003 年宮城県北部の地震における面的調査に基づく震源域の地震動と被害の関係,2003 年宮城県北部地震シンポジウム,2004.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
境有紀	計測震度と被害	地震ジャーナル 39, 25-26	平成 17 年 6 月
境有紀, 小杉慎司, 大月俊典, 中村友紀子	新潟県中越地震で発生した地震動と鉄筋コンクリート造建物の被害	コンクリート工学, Vol.43 No.7, 3-9	平成 17 年 7 月
境有紀, 小杉慎司	地震概要および発生した地震動と被害	特集「福岡県西方沖地震速報」, 建築防災, 2-6	平成 17 年 8 月
境有紀	応答解析から見た地震動の破壊力	最近の被害地震に学ぶー地震動特性と地震荷重ー, 2005 年度日本建築学会大会(近畿)構造部門(振動)パネルディスカッション資料, 15-18,	平成 17 年 9 月

大月俊典, 境有紀	地震被害早期予測プログラムの 開発とそれを通した震度算定法 の検証	日本建築学会大会学術講演 梗概集構造 II, 605-606	平成 17 年 9 月
小杉慎司, 境有紀	整形な鉄筋コンクリート造建物 の耐震性能と損傷度から地震動 強さを推定する方法	日本建築学会大会学術講演 梗概集構造 II, 615-616	平成 17 年 9 月
境有紀	強震観測点周辺の被害と計測震 度の対応性	日本地震工学会大会－2005 梗概集, 40-41	平成 17 年 11 月
境有紀, 中 村友紀子, 大月俊典, 小杉慎司	2004 年新潟県中越地震で発生し た地震動と建物被害の対応性	日本建築学会構造系論文 集, 第 601 号, 69-73	平成 18 年 3 月

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
地震動強さの面的分布出力プログラム	高震度で大きな建物被害と対応する震度算定法を用いて 地震動強さの面的分布を算出し描画する

3) 仕様・標準等の策定

なし