

神大 45 年間の地震工学研究と都市防災への展開

荏本 孝久*

Research Works on Earthquake Engineering for 45 Years at Kanagawa University

Takahisa ENOMOTO*

1. 緒言

1976 年 8 月 1 日に神奈川大学に着任した。所属は工学部建築学科である。建築学科が開設されたのは昭和 43 年（1968 年 4 月）とされているので、開設されて 8 年後ということなる。建築学科には耐震工学の研究を進めておられた多治米辰雄先生（東京都立大学名誉教授）が着任しておられ、研究室の助手として採用された。当時、首都圏を始めとして全国の大学で始まった学生運動の波が収まりつつあるなか、神奈川大学では、まだその余波が続いていた時代であったが。私が東京都立大学大学院在学中からご指導頂いていた国井隆弘先生（土木工学）、望月利男先生（建築工学）、松田磐余先生（自然地理学）との共同研究で、まだ比較的新しい地盤や構造物の動的挙動の解析を行う分野の研究を始めていて、普及し始めたコンピュータを利用して耐震工学や地震工学と言った新しい分野であった。東京大学での大型計算機利用システムを利用したり、神奈川大学工学研究所に設置された電子計算機共同利用システムを利用してプログラム開発やシミュレーション解析を行っていた。このようなコンピュータ技術や科学的知見の進展に伴って、地震が発生した際の建物や構造物の被害を予測する手法の開発が社会的に急務とされていた時代であった。1960 年代になって提唱されるようになった地球規模のプレートテクトニクス理論により地震発生現象の理解が進むようになったことと「関東大震災 69 年説」や「東海地震切迫説」など巨大化する首都圏の防災対策の面から大地震発生の危機感が背景にあった。その状況の中 1974 年伊豆半島沖地震が発生し東京、横浜で震度 5 を記録し、伊豆半島南端の石廊崎に活断層が出現し、周辺の町々に大きな被害が発生した。当時始まった「震災予防研究」に参加されていた多くの研究者も現地調査を開始した。私も初めて実際の地震被災地へ入ることとなった。それ以来、地震災害の被災地へは必ず訪れて調査を行っている。

そのような経験から、事前に地震時の被害を予測する必要性を感じた。計算上で予測するためには、地震の震源モデルにより地震動の予測し、対象地域の地盤震動を計算し、その結果を建物など構造物に入力して、その応答特性から被害を推定するという流れが必要であった。いずれもコンピュータの利用無くしては不可能であった。新しい技術であり、また数値計算で得られる推定結果と実際の

被害との整合性について十分な検証が必要であった。

この技術は、現在では地震被害想定調査として、より高度な技術を利用して、国を始めとして多くの地方自治体で地域防災計画策定のために実施されている。

神奈川大学で過ごした 45 年間の教育・研究活動は、殆どこの一連の研究活動であった。大きくまとめると 3 つの柱があったように思う。「合理的な地震動の予測」、「詳細な地盤区分図と地震防災マップの作成」、「地盤震動特性の理解」の 3 つの課題であり、それらを統合して地震被害予測を考えてきた。その中で、特に将来的に重要であると考えようになった課題は「地盤震動特性の解釈」の問題で、後半の 20 年間余りは”地盤震動”の観測と分析・理解に多くの時間を掛けてきた。地盤震動の問題は、実際の地盤構造が大きく関与しているため、地盤資料（実際には、ボーリングデータ）の収集と“常時微動”の観測という方法を用いて、多くの地域で実施した。建物に被害が発生した地震災害が起きる度に現地調査に向いて、データの収集に努めた。そして、将来の地震災害に備えて、事前に常時微動観測を行って地震災害リスクのマイクロゾーニングを行って、被害の発生し易い地域を細かく特定する研究に繋げてきた。そして、そのような知見を公開し、地域の住民の方が伝え、防災・減災に役立てていく取組みとした。

2. 合理的な地震動予測の研究

コンピュータ技術が急速に普及し始めた 1970 年代当時、構造物の耐震設計や地震災害予測評価の際に用いる入力地震動をどのように設定するかは重要な課題であった。入力地震動を合理的に設定することは大変重要なことであったが、理論的な背景や必要なデータが十分ではなかったため試行錯誤が繰り返されていた。私が携わった地震被害想定の研究では、想定する地域に係る想定地震を設定した上で地震動特性を評価する必要があり、関東地方においては主要な活断層と 1923 年関東大地震 (M=7.9) を対象とするケースが一般的であった。このように地震災害予測評価を試みる場合に地震動特性の設定は基本的に重要であった。

そこで、任意の地点の入力地震動を評価するため、これまでの巨視的断層モデルを用いて多数の中小規模地震の観測記録と比較しながら、地震動の類似性とその震源区域を抽出する試みを実施した。しかしながら、震源過程が複雑であると考えられる大規模な地震については、この種のモデルで震源特性を説明するのは困難であり、断層面上の破壊強度の不均一性を考慮できる多重震源モデルの適用

*教授 建築学科
Professor, Dept. of Architecture

が必要であると考えられる。関東大地震の断層面は余震分布、地殻変動などから推定されており、その断層面内での複雑な破壊を本震及び余震の規模や、既往の研究から得た中小規模地震の地域的な定常性と結び付けることができるのではないかと考えた。このような解析手法として多重震源モデル (Specific Barrier Model4) (以下、バリアモデル) を用いて 1923 年関東大地震の地震動特性を検討した。

そこで、図 1 の小円 (○) に示すように、関東地方に震源をもつ多数の中小規模地震 ($M=3\sim6$ 程度) の検討から、地震動特性の地域的な定常性を検討して、多重震源モデルによる関東地震の地震動特性の検討を行うこととした。その際に森岡・山田によって復元された東京大学本郷構内における加速度記録と比較検討し、表面波による影響を考慮しながら関東地震の震源過程を評価した。さらに首都圏の地下構造をモデル化し、表層地盤のひずみ依存性による弾塑性効果を考慮しながら関東大地震の地震動特性の検討を行った。

図 1 に示した小領域 (要素震源) 毎の震源パラメータと要素震源の破壊の順番となる断層課程を変化させながら多数のパターンで計算し、観測された復元記録に整合する震源モデルと震源パラメータの推定を行った。最終的な結果は図 1 に示したモデルとなり、震源パラメータは表 1 のように設定された。この組み合わせで計算した地震動の時刻歴と復元された時刻歴を図 2 に示めた。また、両者のフーリエスペクトルを図 3 に示した。この震源モデルを用いて、神奈川県を含む関東地方を対象として震度分布を計算して、既往の震度分布図との比較を行い、ある程度の整合性を確認することができた。すなわち、このような多重震源モデルを利用して、要素震源の震源パラメータと震源課程を精度よく設定することができれば合理的な地震動の設定が可能となることが理解できた。

問題は、本手法が既に起きた地震で地震動の観測記録が得られている場合には適用できるが、まだ起きていない地震に関しては要素震源の震源パラメータと震源課程を設定するには不確定性が大きく、確定的かつ合理的な地震動の予測は困難であるということであった。

最近では、このような確定的な地震動の推定法ではなく、歴史的な地震発生の履歴を整理して発生確率を考慮した“確率論的地震動予測法”が開発されて、NIED (国立研究開発法人防災科学技術研究所) から結果が公開されている。

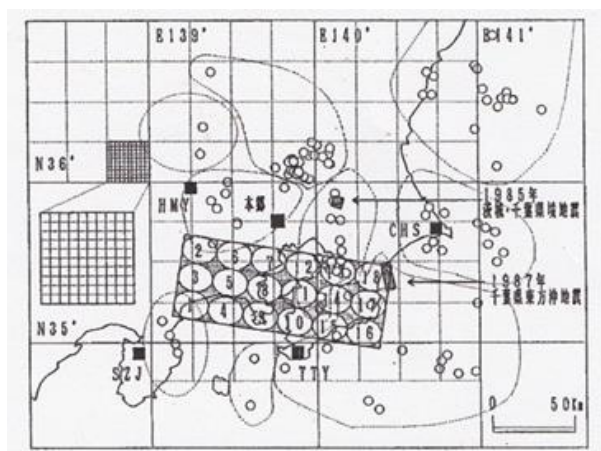


図 1 設定した断層位置と要素資源の破壊順序

表 1 各要素震源に設定した震源パラメーター

要素震源番号	震源位置 (緯度, 経度)	震源深度 (km)	断層面傾斜 (度)	断層面長さ (km)	断層面幅 (km)	断層面面積 (km ²)	断層面断面積 (km ²)	断層面断面積 (km ²)	断層面断面積 (km ²)
1	35.11, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
2	35.18, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
3	35.25, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
4	35.32, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
5	35.39, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
6	35.46, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
7	35.53, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
8	35.60, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
9	35.67, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
10	35.74, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
11	35.81, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
12	35.88, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
13	35.95, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
14	36.02, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
15	36.09, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
16	36.16, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
17	36.23, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
18	36.30, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
19	36.37, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	
20	36.44, 139.10	5.00	2.70	10.83	2.52	12.00	27.201	57.2007	

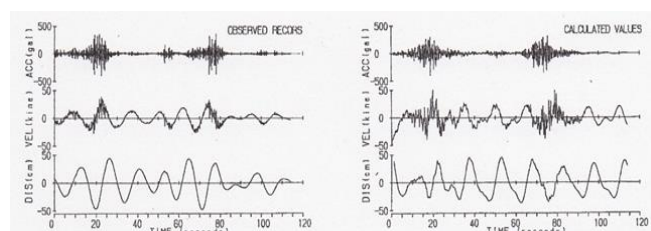


図 2 再現された関東大地震の観測記録 (左) と計算結果 (右)

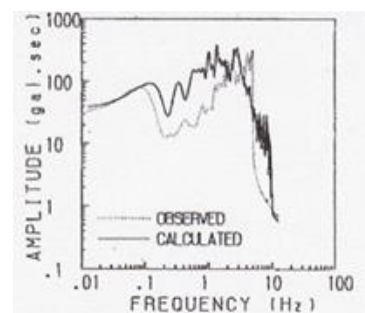


図 3 フーリエスペクトルの比較結果

3. 詳細な地盤区分図と地震防災マップの作成

地震時の被害想定手法もコンピュータ技術の進展に伴って徐々に精緻な方法が取り入れられるようになり、1995 年阪神・淡路大震災以降の 2000 年頃には震源モデルとともに地盤条件も詳細な検討が進められてきた。地盤震動特性 (卓越周期や地盤増幅率) は地盤構造に依存するため、ボーリングデータが必要となるが、このデータは限定的であるため、平面的に均質なデータにはならず、地域地震被害想定調査には限界があった。そのため、既往の地形・地質図などの高度な利用が不可欠であった。

3.1 地盤区分図の作成

全国の揺れやすさマップは、2005 年に内閣府が統一的な作成方法マニュアル (地震防災マップ作成技術資料, 以下, 技術資料) をまとめ、1km メッシュで作成した事例を公表しており、地域内の詳細な揺れの違いを把握するためには、地域の地形の違いに対応したメッシュ規模での評価が必要であるとしている。そのため、神奈川県内各自治体レベルの詳細な地盤の揺れやすさマップ作成のために、神奈川県全域を対象として 50m メッシュでの微地形区分図と地盤増幅率図の作成を行った。

(1) 微地形区分図と地盤増幅率図

神奈川県の微地形区分を縮尺 1/5 万の土地分類基本調査図のうち、地形分類図と表層地質図を用いて 50m メッシュ単位で地形、地質を読み取って作成した神奈川県のデジタル地盤区分図を用い、技術資料による微地形区分設定手順に基づき 15 区分の微地形を設定し、微

地形区分図を作成した。作成した微地形区分図を図 1 に示す。より原図に示されているような自然に近い形で微地形区分が表現されている。作成した地盤増幅率図を図 4 に示す。なお、作成した神奈川県全域の 50m メッシュによる微地形区分図と地盤増幅率図は防災フロンティア HP で“神奈川県版揺れ易さマップ”として公開した。



図 4 微地形区分図 (50mメッシュ)

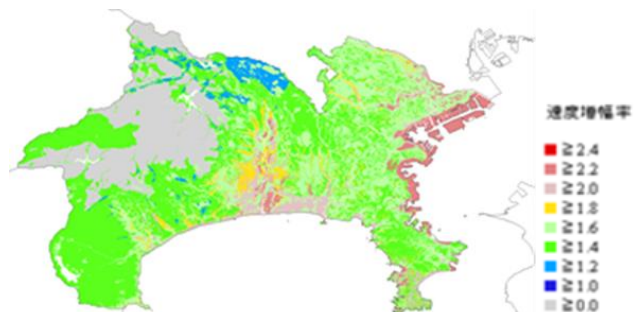


図 5 地盤増幅率図 (50mメッシュ)

3.2 地震防災マップの作成

近い将来、来るべき大地震への備えにおいては、地域住民の防災意識の高揚が重要で、それを喚起するための情報が不可欠である。国や自治体などの行政機関も防災情報を公開していたが、より住民の防災意識を高めるためには、地域に密着した情報が必要であった。

地域防災力の向上には、住民が地域の地震災害に対する危険性を正しく理解・認識することが必要である。住民に理解されやすい情報としては、具体的な地域やシナリオに基づいた評価を視覚的に表現することが重要である。ここでは、神奈川県全域において建物データを整備し、神奈川県に影響を及ぼすと考えられる地震が発生した場合の建物被害率を算出し、地域危険度マップの作成を行った。

(1) 建物の構造別・建築年代別データの作成

地域危険度マップの作成にあたって、建物の構造種別や建築年代別の分布状況を把握することが重要となる。ここでは、神奈川県県土整備部による平成 12 年度基礎調査・建物現況の 1 棟単位のデータを用いて、建物の構造種別・建築年代別棟数を 50m メッシュ単位で整備した。構造種別に関しては、木造・RC 造(SRC 造含む)・S 造・軽量 S 造・その他・不明の 6 種類、建築年代に関しては、1971 年以前・1972 年～1981 年・1982 年以降の 3 期間に分けてそれぞれ集計を行った。結果の一例として 50m メッシュの木造建物の棟数分布を図 6 に、非木造建物の棟数分布を図 7 に示す(全建築年代の総数)。

(2) 地震動の予測

神奈川県に影響を及ぼすと考えられる 10 地震を想定地震として設定した。各想定地震による工学的基盤の最大速度を司ほか(1999)に

よる距離減衰式で求め、表層地盤増幅率を乗じることにより地表での最大速度を算定した。地表での震度は、童ほか(1996)による最大速度と計測震度の経験式を用いて換算し、震度分布図を作成した。各地震による震度分布図を図 8 に示す。

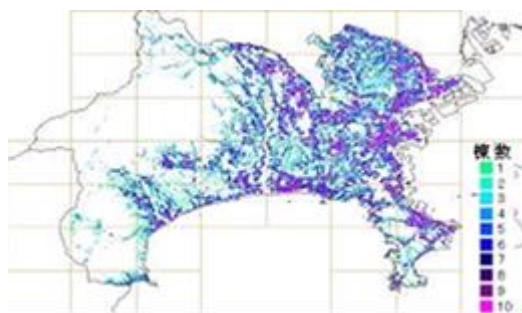


図 6 木造建物の棟数分布(50m メッシュ)

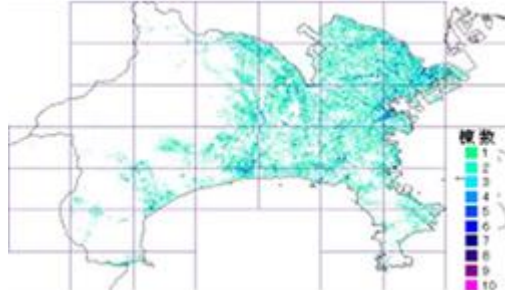


図 7 被木造建物の棟数分布(50m メッシュ)

(3) 地域危険度マップの作成

建物全壊棟数は、地表の最大速度と建物棟数から村尾ほか(2000)の被害関数を用いて 50m メッシュで計算した。地域危険度マップ作成においては、50m メッシュで計算した建物全壊棟数を 250m メッシュで集計して建物全壊棟数率を算出し、建物全壊棟数率を基に 7 段階の建物被害危険度ランクを設定した。地域危険度マップの一例として、関東地震の結果を図 9 に示す。同図から、太平洋沿岸付近と河川沿いの平野部を中心に、建物危険度 7 (全壊率 30%以上) の地域が広がっている。図 8 から神奈川県では関東地震が支配的であり、他の地震の最大震度を概ね包含していることがわかる。

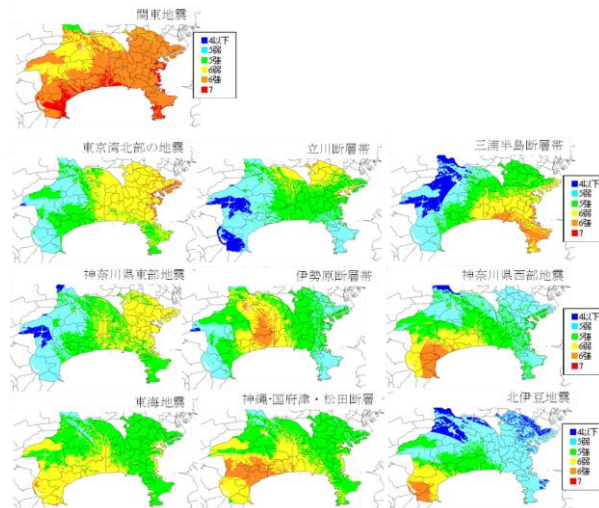


図 8 各想定地震による震度分布

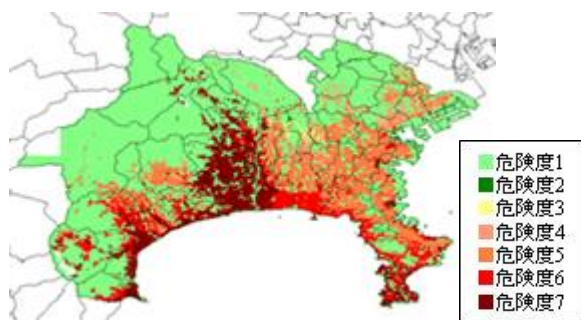


図9 関東地震を想定した場合の危険度マップ

4. 地盤震動特性の理解

地震時の被害を予測するため地震動の合理的な特性を理解することが重要であると考えて、震源特性や地盤特性をより精緻に考慮することを考えてきたが、中でも表層地盤の特性が重要であるとの考えに至り、その特性を分析に取り入れることを考える必要があった。表層の地盤震動特性の把握のためには、ボーリング調査や地震観測記録など、幾つかの方法が利用されているが、広域を対象として詳細な地盤震動特性を把握するための効果的な方法の一つに、常時微動観測による方法が挙げられた。常時微動は人工的あるいは自然現象で発生する微細な振動（ノイズ）で地盤も常時揺れている。その信号をセンサーで記録・分析するもので、我国では1950年ころから利用されている。研究室では1990年代から神奈川県を中心に継続的に高密度微動観測を行ってきた。そして、HVS特性（水平動と上下動のスペクトル比）から、卓越周期（ T_m ）とピーク値（ R_m ）の両者を用いて簡便な地盤の評価指標として定義した地盤ハザード（PE）の適用性について検討を行った。ここでは、横浜市を対象とした研究結果を示す。

横浜市の地形は、丘陵地・台地・段丘・低地・埋立地に分けられる。丘陵地と台地が市域全体の約7割を占め、残りの3割が河川に沿った沖積低地と臨海部の埋立地から成っている。2000年頃に横浜市では150地点の強震観測施設が整備され、しかもボーリングデータが多数存在していることから、常時微動観測結果の有用性を検討するうえで多くの利点があった。

この常時観測によるHVS特性による卓越周期分布とピーク値の分布を微地形毎に整理した、 T_m と R_m の分布を図10をまとめた。分布図から、河川沿いで T_m 、 R_m 共通して値が大きい地域がいくつか確認できる。一方で、 T_m はそれほど大きくないが、 R_m が大きな地域や、両者が中程度の大きさの地域、両者が小さい地域などが確認できる。また、上述の地盤ハザード（PE）を算定し5区分のランクで図11に示した。ランクが高い場所は地震災害リスクの高い場所に該当している。

5. 結言

以上のような地域の地震時の揺れの強さを事前に評価する研究は、大変時間が掛かる現地調査が必要で、多くの調査は研究に所属した大学院生や学部の卒研生の協力で実現することができた。本報告書には触れなかったが、神奈川県全域（低地が主体）では約20

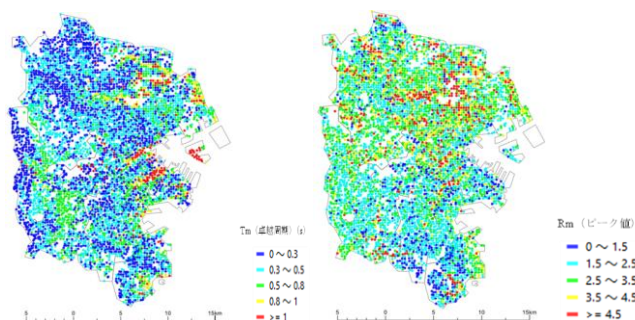


図10 卓越周期 T_m (左) とピーク値 R_m (右) の分布

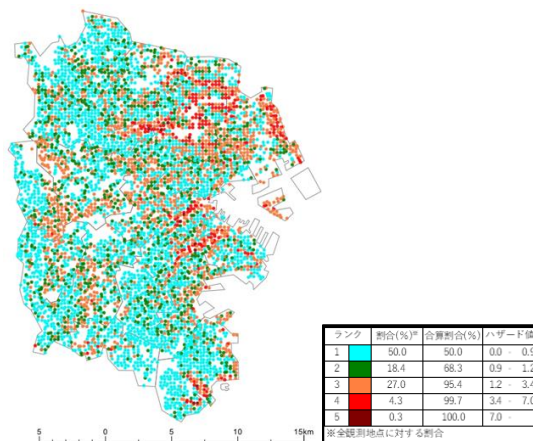


図11 地盤ハザード（PE）の分布

年かけて10,000点超の観測データを収録し分析した。

また神奈川県に限らず、神戸市、新潟市、長野市、熊本市、福島県、山形県など多くの被害地震が発生して地域を中心に常時微動観測を行ってきた。また、1977年から1978に掛けて当時の長期在外研究員制度でスペイン・アルメリア大学に滞在して共同研究を実施した。アルメリアが位置するスペイン南部は、ヨーロッパでも地震危険度の高い地域で、一緒にアルメリア市のマイクロゾーニング研究を行って、その成果を国際会議などで発表した。当時欧州での常時微動を用いた研究は殆ど無く、その有用性を認めてもらう契機となり、現在も共同研究は続いている。

謝辞

神奈川大学で45年間という長い期間に在職し多岐に亘り多くの経験をさせて頂いた。その間、建築学科に在職された先生方、研究室の助手の先生方、ゼミ生の方々には、多大なご支援とご協力を頂きました。最後になりましたが、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中野尊正；震災予防研究の課題，総合都市研究第2号，1978
- 2) 日本建築学会地盤震動小委員会；地震動と地盤—地盤震動シンポジウム10年の歩み—，日本建築学会，1983
- 3) 長橋純男；建築構造物を対象とした設計用入力地震8動の強さ，地震，第2輯，第46巻，pp.513-532，1994
- 4) 笹本 努；多重震源モデルによる1923年関東大震災の地震動特性の再検討とその震度分布に関する研究，神奈川大学大学院修士論文，1992年
- 5) 落合 努，大伏徹志，荏本孝久；常時微動による地域特性を考慮したハザードマップの作成，日本地震工学会論文集，pp.13-22，2020年