

確率論的余震ハザード評価手法の構築と  
工学的応用

(Methodology Development and Engineering  
Applications of Probabilistic Aftershock Hazard  
Analysis)

崔 炳賢

確率論的余震ハザード評価手法の構築と  
工学的応用

(Methodology Development and Engineering  
Applications of Probabilistic Aftershock Hazard  
Analysis)

平成 26 年 3 月

崔 炳賢

## 論文要旨

論文題目： 確率論的余震ハザード評価手法の構築と工学的応用

氏名： 崔 炳賢

2011年3月11日に三陸沖を震源とした日本観測史上最大となるマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。その後に岩手県沖から茨城県沖までの広範囲に渡る余震域において数千回の余震が発生した。余震は本震被害の発生後に断続的に発生するため、本震による被害を前提とし緊急時対応や復旧活動の計画には余震の発生を考慮すべきであり、本震に対する防災・減災対策に加えて、余震に対する対策を行う必要がある。

近年、事業継続の観点から復旧の重要性が認識されており、これらの対応の基本的な方針については、本震発生前に計画されることが望ましい。東北地方太平洋沖地震の余震により、すでに本震によって損傷を受けた建物の倒壊や水道施設の被害による断水、通行止めなどのライフラインの被害による復旧の遅れ、救援活動の遅れなどが報告された。一方、中央防災会議等による防災対策では余震の影響を考慮していないため改善の余地がある。余震はその発生位置、規模、頻度が不確定であるため確率的に考えることが効果的であり、余震の確率論的地震ハザード評価はこのような余震特有の課題に対して合理的な意思決定のための有効な手段と考えられる。具体的には本震発生直後3日程度の初動及び応急活動期の余震ハザード評価を行い、救助活動の優先順位決定、避難区域及び期間設定などの避難計画策定、電気、水道、ガス、道路などのライフライン復旧作業の開始時期の目安設定などに使われることが考えられる。また本震発生後3日から30日程度の復旧活動期のハザード評価結果は、建築土木構造物の復旧作業の実施時期などの計画策定に用いられることが考えられる。

余震ハザード評価手法に関する研究は余震が多かった2004年の新潟県中越地震以降、盛んに検討されるようになり、確率論的余震発生モデルについては地震調査研究推進本部により標準的な評価手法が提案されている。しかしマグニチュード9規模の地震によるマグニチュード7を超える規模の余震、特に海溝型地震に着目した

検討はあまりされていない。また従来では本震発生直後に余震ハザード評価を行うことに重点が置かれてきたが、一方では地震発生直後に余震ハザードを精度よく評価することが難しいことも指摘されている。本震発生前に余震対策を検討するためには、これらの不確定性も踏まえた包括的なモデルが必要である。

本論文では以上のような海溝型巨大地震後の余震に関する課題を解決するため、海溝型巨大地震の余震を対象とする確率論的余震ハザード評価の枠組み構築とその活用法を提案する。

第 2 章では、過去に発生した海溝型巨大地震の余震記録の分析を行い、地震間誤差によるばらつきを含んだ確率論的余震発生モデルを提案する。

第 3 章では、第 2 章で提案した確率論的余震発生モデルを用いた余震ハザード評価手法の提案を行う。提案手法の妥当性を確認するため、東北地方太平洋沖地震に対する余震ハザード結果と実測値の比較と提案パラメータの感度解析を行う。また提案する余震ハザード評価手法を将来の海溝型巨大地震に適用した事例を紹介する。

第 4 章では、余震ハザード評価手法の復旧活動への活用法として、巨大地震直後に本震 PGV を超える余震数に関する余震ハザードマップを提案する。余震ハザードマップは本震発生直後の避難区域設定や復旧活動の優先順位設定などの意思決定及び余震による停電予測、電車の運休などの被害予測に活用することが出来る。

第 5 章では、海溝型巨大地震が発生すると高い確率で津波も発生することが知られており、海岸沿いに位置する津波避難ビルや防潮堤や原子力発電所建屋のような施設の設計のための海溝型巨大地震直後の余震と津波の荷重組み合わせの合理的な評価手法を提案する。そのため、限界状態設計法に基づく信頼性解析を行い、余震と津波の荷重組み合わせを評価し、耐津波設計における荷重・耐力係数を提案する。

第 6 章では、本研究で得られた知見についてまとめを行い、今後の課題について述べる。本論文では、海溝型巨大地震の余震を分析して確率論的余震発生モデルと余震ハザード評価手法を提案する。また、その応用例として、復旧活動計画のための余震ハザードマップと耐津波設計における余震と津波の荷重組み合わせ評価手法を提案する。今後の課題として、誘発地震への対応、余震発生空間的特性の考慮等があり、将来的にはより複雑なマルチハザード評価やより具体的な余震防災対策への応用が期待される。

## Abstract

### Methodology Development and Engineering Applications of Probabilistic Aftershock Hazard Analysis

Choi Byunghyun

A March 11, 2011 earthquake occurred with the magnitude of 9 in the Tohoku's Pacific Ocean area. After the main shock, thousands of aftershocks occurred and the distribution of their epicenters ranged from the Iwate sea area to Ibaraki sea area. Since aftershocks occur continuously after significant damage due to the main shock, it is necessary for emergency reactions or restoration activities just or several days after the main shock to take into consideration of the occurrence of aftershocks. This means, in addition to the measures of disaster prevention and mitigation against main shock, it is necessary to conduct measures against aftershocks.

Recently, the importance of restoration is getting more recognized from the viewpoint of contingency plan and such basic policy for reaction is desirable to be planned before a main shock occurs. As the aftershock damages reported after the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake, there were reports for the collapses by the aftershocks of buildings already damaged by the main shock, the delay in restoration activities due to lifeline damages such as water shut-off by the damage in water supply facilities or no-passing zones and the delay in rescue activities. Meanwhile, there still remains a room for improvement because the disaster prevention measures by the Central Disaster Management Council of Japan do not consider the influence of aftershocks. Because of the uncertainty of the occurrence location, scale and frequency of aftershocks, probabilistic consideration is more effective, and the probabilistic earthquake hazard evaluation of aftershock is deemed to be effective means for more reasonable decision-making on the unique tasks of such aftershocks. Through the aftershock hazard evaluation of early and emergency activities for the first 3 days from the occurrence of a main shock, it is possible to use for the purpose of establishing disaster prevention plans such as designating evacuation area and period of evacuation, which are

necessary for rescue activity, or the purpose of deciding the time of beginning restoration activities for lifeline such as electricity, water supply, gas, road, etc. Furthermore, the hazard evaluation result for the restoration period of 3 to 30 days after the occurrence of a main shock can be possibly used to schedule plans for restoration of damaged buildings or engineering structures.

The studies on the methods of aftershock hazard evaluation were mainly made after the 2004 Niigata Chuetsu earthquake that had a lot of aftershocks, and standard evaluation methods were proposed by the Headquarters for Earthquake Research Promotion for probabilistic aftershock occurrence models. But few reviews were made on aftershocks at more than magnitude 7.0 followed by magnitude 9.0 main shock, especially focusing on trench earthquakes. In the previous study, more focus was made on performing the aftershock risk evaluation right after the occurrence of a main shock but it has been also pointed out that performing precisely the aftershock hazard right after a main shock would be difficult. In order to review measures before a main shock occurs, a comprehensive model in consideration of such uncertainty is necessary.

In this dissertation, a probabilistic aftershock hazard analysis method and its applications are proposed on the aftershocks followed by a trench-type gigantic earthquake in order to solve the above tasks.

In chapter 2, using the analysis of the past aftershock record, a probabilistic aftershock occurrence model that includes prediction error on the parameters is proposed.

In chapter 3, in order to confirm validity of the proposed methods, the sensitivity analysis and a comparison of aftershock hazard with the observation of the 2011 Tohoku earthquake is performed. Especially, this study aimed to propose a model that includes prediction error on the parameters used in aftershock hazard analysis and propose a method that can be usable for restoration activity plans through evaluating aftershock hazard of future trench-type gigantic earthquakes.

In chapter 4, as a detailed method of application, this study proposed an aftershock hazard map for the occurrence of aftershocks that exceed PGV of main shock level. The aftershock hazard map is expected to be utilized in decision-making such as designating evacuation

zones and establishing priority for restoration activities right after a main shock and forecasting damages such as power outage and non-operation of trains.

It is also known that there is high probability of tsunami in case a trench-type gigantic earthquake occurs. Therefore, both aftershock and tsunami should be considered simultaneously for designing facilities located at seashore such as tsunami refuge building, seawall and nuclear power plant. In chapter 5, this study proposed a method to evaluate reasonably aftershocks and tsunami load combination on the tsunami-resistant design, through conducting a reliability analysis in order to evaluate the load combination in case aftershocks and tsunami occur simultaneously after a trench-type gigantic earthquake.

In conclusions, the probabilistic aftershock hazard analysis method for the aftershocks of the future trench-type gigantic earthquake is proposed. And as its applications, the aftershock hazard map for restoration activity plans and a method to evaluate reasonably aftershocks and tsunami load combination on the tsunami-resistant design are proposed. As future research topics relevant to the present work are consideration of remotely triggered earthquake, spatial characteristic aftershock occurrence. In the future, more complex multi-hazard assessment and more specific aftershock disaster prevention measures are expected.

## 논문요지

논문제목 : 확률론적 여진 해저드 평가 수법의 구축과 공학적 응용

### 최 병현

2011년 3월 11일, 산리쿠오키(三陸沖) 해역을 진원으로 한 일본 관측사상 최대인 매그니튜드 9.0의 도호쿠 지방 태평양 해역 지진이 발생했다. 본진 발생 이후, 이와테현(岩手県) 해역에서 이바라키현(茨城県) 해역까지 매우 넓은 영역에 걸쳐 수천회의 여진이 발생했다. 여진은 본진에 의한 피해가 발생한 이후, 지속적으로 발생하기 때문에, 본진에 의한 피해를 전제로 한, 긴급 대응이나 복구 활동 계획에는, 여진 발생을 고려할 필요가 있으며, 본진에 대비한 방재, 감재 대책에 추가로 여진에 대비한 대책을 시행할 필요가 있다.

최근, 업무 연속성 계획의 관점으로부터 복구의 중요성이 인식되고 있으며, 이러한 대응의 기본적 방침은 본진 발생 전에 계획해 두는 것이 바람직하다. 도호쿠 지방 태평양 해역 지진의 여진에 의해서, 이미 본진에 의해 손상을 입은 건물의 여진에 의한 붕괴, 수도 시설 피해에 의한 단수나 도로의 통행 금지 등의 라이프 라인 피해로 인한 복구 활동의 지연, 구조 활동의 지연 등의 보고가 있었다. 한편, 중앙 방재 회의(中央防災會議)에 의한 방재 대책에서는 여진의 영향을 고려하지 않고 있기 때문에 개선의 여지가 있다. 여진은 그 발생 위치, 규모, 빈도의 불확정성 때문에, 확률론적으로 고려하는 것이 효과적이고, 여진의 확률론적 지진 해저드 평가는 이러한 여진 특유의 과제에 대하여 합리적인 의사 결정을 위한 유효한 수단이라고 생각한다. 구체적으로 본진 발생 으로부터 3일 정도의 초동 및 응급 활동기의 여진 해저드 평가를 통하여, 구조 활동의 우선 순위 결정, 피난 구역 및 피난 기간 설정 등의 피난에 관한 계획 책정이나, 전기, 수도, 가스, 도로 등의 라이프 라인 복구 작업의 개시 시기를 결정하는 등의 목적으로 사용하는 것이 가능하다. 또한 본진 발생 후 3일에서 30일 정도의 복구 활동기의 해저드 평가 결과는 손상 입은 건물이나 토목 구조물의

복구 작업의 실시 시기 등의 계획 책정에 사용 가능 할 것이다.

여진 해저드 평가 수법에 관한 연구는 여진이 많이 발생 했던 2004 년 니가타현 츠에쓰 지진 (新潟県中越地震) 이후 많은 검토가 행해졌고, 확률론적 여진 발생 모델에 대해서는 지진 조사 연구 추진 본부에 의해 표준적인 평가 수법이 제안 되었다. 그러나, 매그니튜드 9 규모의 본진에 의한 매그니튜드 7 을 넘는 여진, 특히 해구형 지진에 주목한 검토는 별로 이루어 지지 않았다. 또한 종래에는 본진 발생 직후에 여진 리스크의 평가를 수행하는 것에 중점이 놓여져 있었으나, 지진 발생 직후에 여진 해저드를 정확히 평가하는 것이 어렵다는 지적도 있다. 본진 발생 전에 대책을 검토하기 위해서는, 이러한 불확정성도 고려한 포괄적인 모델이 필요하다.

본 논문에서는, 이상의 해구형 거대 지진 후의 여진에 관한 과제를 해결하기 위해, 해구형 거대 지진의 여진을 대상으로 한 확률론적 여진 해저드 평가 수법과 그 활용법을 제안한다.

제 2 장에서는, 과거에 발생한 해구형 거대 지진의 여진 기록을 분석하여, 지진간 오차를 포함한 확률론적 여진 발생 모델을 제안한다.

제 3 장에서는, 제 2 장에서 제안한 확률론적 여진 발생 모델을 사용한 여진 해저드 평가 수법을 제안 한다. 제안 수법의 타당성을 확인 하기 위하여, 도호쿠 지방 태평양 해역 지진에 적용한 여진 해저드 결과와 실측값의 비교 및 제안 파라미터의 감도해석을 수행한다. 또한 제안 여진 해저드 평가 수법을 장래의 해구형 거대 지진에 적용한 사례도 소개한다.

제 4 장에서는, 여진 해저드 평가 수법을 복구 활동으로의 활용법으로써, 거대 지진 직후의 본진 PGV 를 넘는 여진수 에 대한 여진 해저드 맵을 제안한다. 여진 해저드 맵은 본진 발생 직후의 피난 구역 설정 및 복구 활동의 우선순위 설정 등의 의사 결정과 여진에 의한 정전 예측, 기차의 운행 여부 등의 피해 예측에 활용이 기대된다.

제 5 장에서는, 해구형 거대 지진이 발생 하면 높은 확률로 쓰나미가 발생하는 것으로 알려져 있어, 해안가에 위치한 쓰나미 피난 빌딩이나 방조제, 원자력 발전소와 같은 시설의 설계를 위한, 해구형 거대 지진 직후의 여진과 쓰나미의 하중 조합의 합리적인 평가 수법을 제안한다. 본 연구에서는, 한계 상태

설계법을 기본으로 한 신뢰성 해석을 수행하여, 여진과 쓰나미의 하중 조합을 평가하여, 내쓰나미 설계의 하중 및 내력 계수를 제안한다.

제 6 장에서는, 본 연구에서 얻어진 결과와 향후의 과제에 관해 정리한다. 본 논문에서는, 해구형 거대 지진의 여진을 분석하여, 확률론적 여진 발생 모델의 제안과 여진 해저드 평가 수법을 제안한다. 또한, 그 응용 예로써, 복구 활동 계획을 위한 여진 해저드 맵과 내쓰나미 설계를 위한 여진과 쓰나미 하중 조합 평가 수법을 제안한다. 향후의 과제로는, 유발 지진의 대책, 여진 발생의 공간적 특성의 고려 등이 있고, 장래적으로는 보다 복잡한 멀티 해저드 평가 및 보다 구체적인 여진 방재 대책으로의 응용 등이 기대된다.

## 目次

### 論文要旨

<b>第 1 章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 本研究の背景 .....	1
1.1.1 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震発生状況.....	1
1.1.2 余震の定義と余震被害の特徴 .....	5
1.2 既往の研究 .....	6
1.3 本研究の目的.....	7
1.4 本論文の構成.....	9
1 章の参考文献.....	11
<b>第 2 章 確率論的余震発生モデル及びパラメータの提案</b> .....	<b>13</b>
2.1 はじめに .....	13
2.2 本研究における余震の対象範囲 .....	15
2.3 確率論的余震発生モデルの提案 .....	17
2.3.1 宇津及び Reasenberg & Jones モデル.....	17
2.3.2 提案モデル.....	18
2.4 東北地方太平洋沖地震の余震記録の分析 .....	19
2.4.1 東北地方太平洋沖地震の余震と過去本震との比較.....	19
2.4.2 東北地方太平洋沖地震の余震と過去の主な海溝型地震の余震の比較.....	24
2.5 過去の余震記録によるパラメータの提案 .....	28
2.5.1 余震記録.....	28
2.5.2 本震マグニチュードと各パラメータの関係 .....	31
2.5.3 本震発生からの経過時間による $b$ 値の変化.....	36

2.6	まとめ .....	38
	2章の参考文献.....	39
<b>第3章</b>	<b>提案モデルの余震ハザード評価への適用 .....</b>	<b>40</b>
3.1	はじめに .....	40
3.2	余震ハザード評価式.....	41
3.3	提案モデルの適用性確認.....	44
3.3.1	余震ハザード解析条件.....	45
3.3.2	パラメータの感度解析.....	45
3.3.3	提案モデルの地震間誤差の評価手法.....	47
3.3.4	余震ハザードと観測値との比較.....	48
3.3.5	本震発生からの時間経過による余震ハザード.....	51
3.4	適用事例.....	53
3.4.1	1923年関東地震への適用.....	53
3.4.2	東海・東南海連動型地震への適用 .....	55
3.5	まとめ .....	58
	3章の参考文献.....	59
<b>第4章</b>	<b>余震ハザードマップの提案と応用例 .....</b>	<b>60</b>
4.1	はじめに .....	60
4.2	余震ハザードマップの提案 .....	61
4.2.1	解析条件 .....	61
4.2.2	鎌倉における余震ハザード結果.....	63
4.2.3	余震ハザードマップ .....	66
4.3	本震発生直後における提案手法の適用性評価 .....	72
4.3.1	解析条件 .....	72

4.3.2	鎌倉における余震ハザード結果.....	74
4.3.3	時間経過による余震ハザードマップ.....	77
4.4	余震ハザードマップの応用.....	80
4.5	まとめ.....	81
	4章の参考文献.....	82
<b>第5章</b>	<b>耐津波設計における余震と津波の荷重組み合わせの提案.....</b>	<b>83</b>
5.1	はじめに.....	83
5.2	余震と津波の荷重組み合わせ評価手法.....	84
5.2.1	解析条件.....	85
5.2.2	荷重及び耐力のモデル化.....	87
5.2.3	解析手法.....	96
5.3	解析結果.....	97
5.4	まとめ.....	112
	5章の参考文献.....	113
<b>第6章</b>	<b>結論.....</b>	<b>114</b>
5.1	まとめ.....	114
5.2	今後の課題.....	116
<b>付録</b>	<b>.....</b>	<b>118</b>
A.	既知の $b(T_1)$ 、 $M_m$ 、 $D_1$ による総余震数 $N$ の推定法.....	118
B.	拡大断層面と実際の余震震源との比較.....	121
C.	時間関数 $b$ 値による余震ハザードへの影響.....	124
D.	震度5弱を超える余震数に関する余震ハザードマップ.....	126
	関連研究活動リスト.....	132
	謝辞.....	133

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 本研究の背景

#### 1.1.1 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震発生状況

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃に三陸沖の深さ約 24km を震源とした日本の観測史上最大となるマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生した。その余震は本震の規模を反映して非常に多数発生し、余震域は岩手県沖から茨城県沖までの広範囲に渡った。

気象庁による図 1.1<sup>[1]</sup>と表 1.1<sup>[2]</sup>によると、本震発生から三ヶ月間で発生した余震数は 500 回を超え、マグニチュード 7 を超える余震も 5 回発生し、死者も発生した。ただし、表 1.1 では本震発生以降に発生した全ての地震を余震としているため、本震による断層面から飛び離れた場所で発生する誘発地震も含まれているが、誘発地震は 2.2 節の本研究における余震の対象範囲に含まれないため注意が必要である。特に図 1.1 によると単位時間当たりの余震発生率は本震発生から時間経過と共に減っていくことが確認出来、全体の約 50%が本震発生から約 10 日間で、全体の約 70%が本震発生から約一カ月間で発生した。

気象庁による東北地方太平洋沖地震以降の M5.0 以上の余震震央分布図及び余震活動領域を図 1.2 に示す<sup>[3]</sup>。図 1.2 によると、東北地方太平洋沖地震の余震は岩手県沖から茨城県沖を含む余震活動域においてほぼ一様に発生することが分かる。一方、規模の大きな余震に対しては、ある傾向を把握することは難しく、不規則に発生していることが分かる。

海域で発生した主な地震の余震回数比較（※本震を含む）  
（マグニチュード5.0以上）

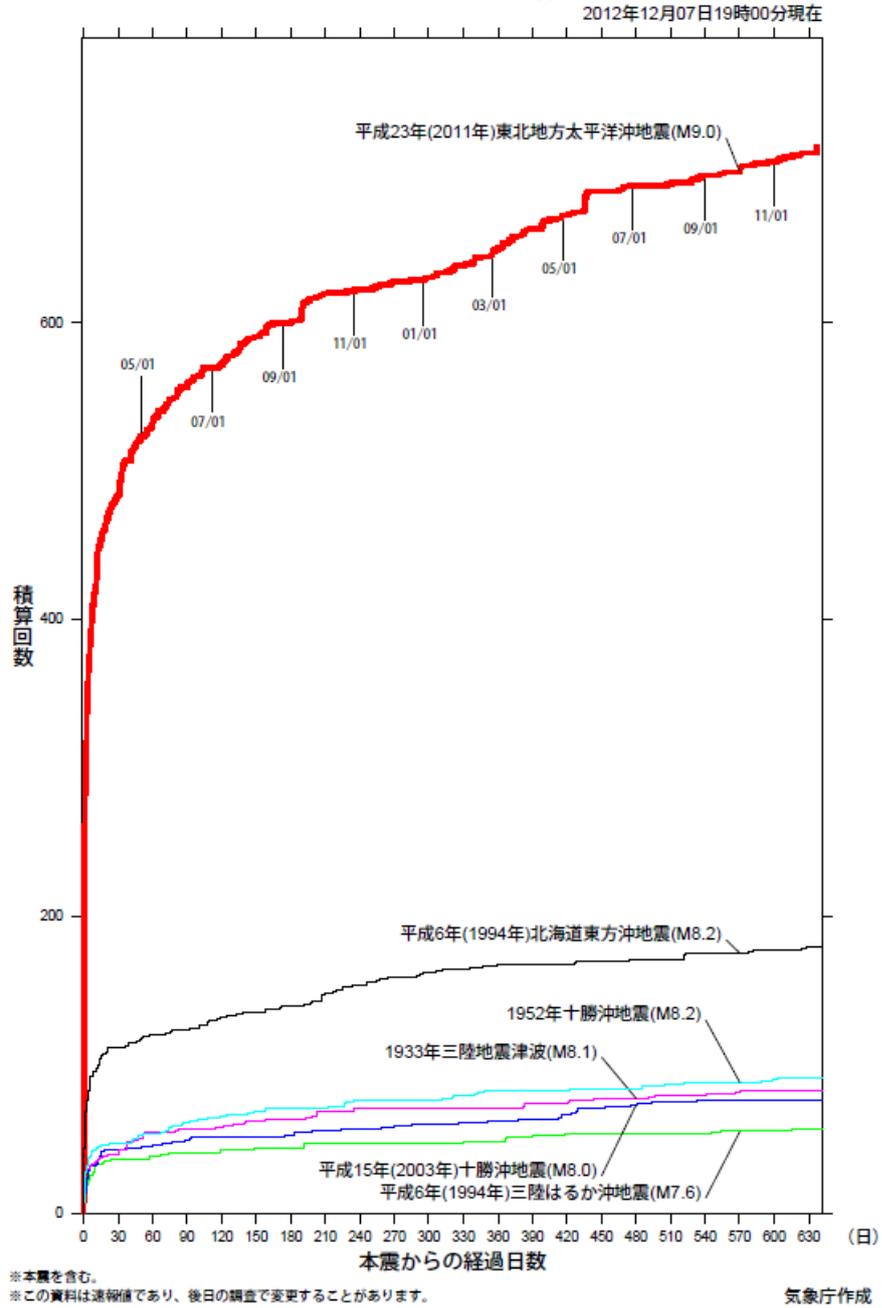


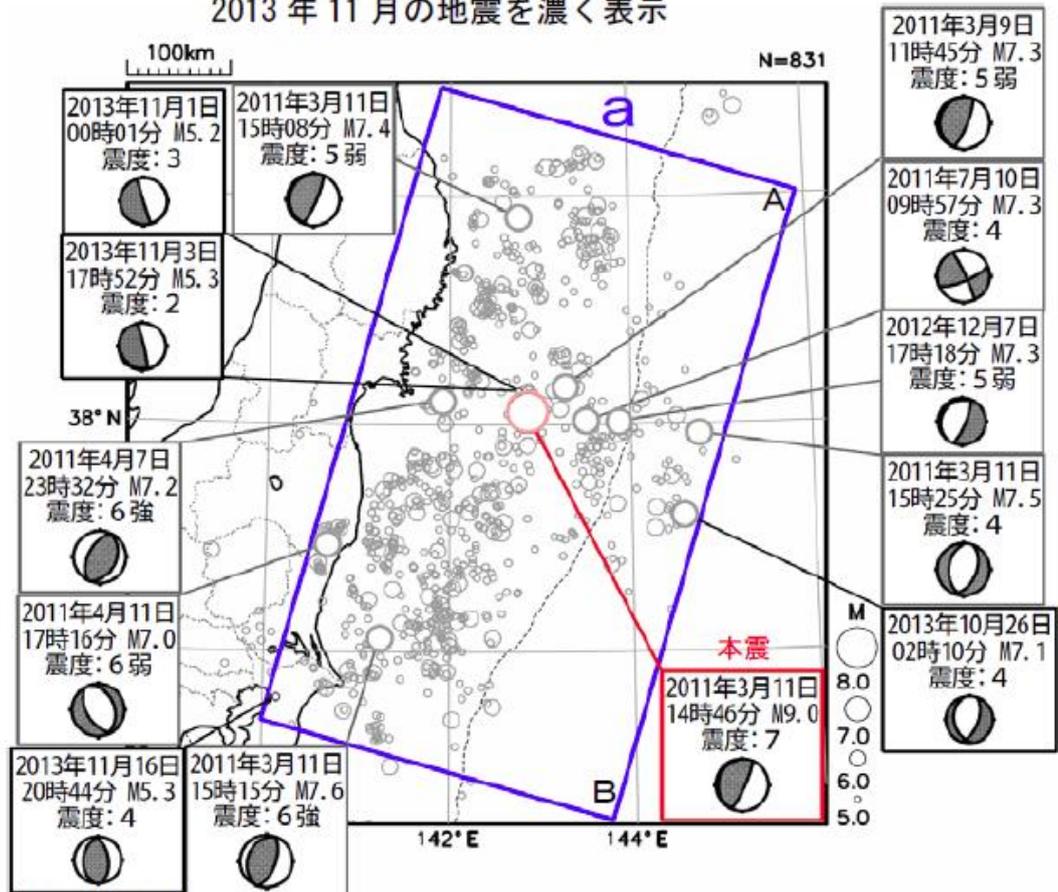
図 1.1 気象庁による M5.0 以上の余震の積算回数のこれまで海域で発生した主な地震との比較<sup>[1]</sup>

表 1.1 東北地方太平洋沖地震から 3 カ月間で発生し主な余震被害（[2]に加筆）

発生年月日	M	震央地名 地震名	人的被害	物的被害	最大 震度	津波
2011/3/11	9.0 *1	三陸沖 東北地方太平洋沖地震	死 18,493 不明 2,683 負 6,217 *2	全壊 128,801 棟 半壊 269,675 棟 一部破損 756,814 棟 など *2	7	9.3m 以上 *3
2011/3/12	6.7	長野県新潟県境付近 *6	死 3 負 57 *4	全壊 73 棟 半壊 427 棟 など *4	6 強	
2011/3/15	6.4	静岡県東部	負 75	半壊 103 棟 一部破損 984 棟	6 強	
2011/4/1	5.0	秋田県内陸北部 *6	負 1	一部破損 2 棟	5 強	
2011/4/7	7.2	宮城県沖	死 4 負 296	*5	6 強	
2011/4/11	7.0	福島県浜通り	死 4 負 10	*5	6 弱	
2011/4/12	6.4	福島県中通り	負 1	*5	6 弱	
2011/4/16	5.9	茨城県南部	負 6	なし	5 強	

- ・特に注釈を付けているものを除き、人的被害と物的被害は総務省消防庁による。
- ・\*1 地震の規模（マグニチュード）、ただし、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震はモーメントマグニチュード。
- ・\*2 人的被害及び物的被害については、平成 23 年 3 月 11 日に発生した「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」の余震による被害および 3 月 11 日以降に発生した余震域外の地震で被害の区別が不可能なものも含む。
- ・\*3 観測施設が津波により被害を受けたためデータを入手できない期間があり、後続の波でさらに高くなった可能性がある。
- ・\*4 新潟県（平成 24 年 3 月 9 日現在）および長野県（平成 24 年 10 月 1 日現在）による。3 月 12 日に発生した長野県・新潟県境付近の地震の被害状況には、その余震による被害も含む。
- ・\*5 物的被害は、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の被害に含まれている。
- ・\*6 本震断層面から飛び離れた場所で発生した誘発地震である。

**震央分布図**  
 (2011年3月1日～2013年11月30日、深さすべて、 $M \geq 5.0$ )  
 2013年11月の地震を濃く表示



発震機構はCMT解  
 $M7.0$ 以上の地震と2013年11月に発生した地震に吹き出しをつけた。

図 1.2 気象庁による東北地方太平洋沖地震以降の  $M5.0$  以上の余震震央分布図及び余震活動領域<sup>[3]</sup>

### 1.1.2 余震の定義と余震被害の特徴

三省堂の大辞林(第二版)による定義では、余震は「本震発生の直後からある期間、本震の震源域やその付近でおこる、本震より小さい地震」とある<sup>[4]</sup>。しかし、この定義の中では不確定性を持つ単語が多く含まれている。例えば、「本震発生の直後からある期間」とは時間的にいつまでなのか、「本震の震源域やその付近」とは空間的にどこまでなのか、「本震より小さい」とは規模面でどれくらい小さい地震なのかなどのように時間的、空間的、規模面において不確定性が含まれていて、一概に定義することは難しい。また気象庁による余震の定義<sup>[5]</sup>は、「比較的大きな地震が発生すると、その近くで最初の地震より小さな地震が続発する。この最初の大きな地震を本震、その後に引き続き起こる地震を余震という。」となっていて、時間的及び空間的に明確な基準は示されていない。

余震は巨大地震による本震被害の発生後に断続的に発生するため、巨大地震後の緊急時対応や復旧活動の計画には、本震による被害と余震被害を考慮した計画を立てるべきである。以上のように、本震に対する防災・減災対策に加えて、余震に対する対策を行う必要がある。近年、事業継続の観点から復旧の重要性が認識されており、これらの対応の基本的な方針については、本震発生前に計画されることが望ましい。上述のように、余震はその発生位置、規模、頻度が不確定であるため確率的に考えることが効果的であり、余震の確率論的地震ハザード評価はこのような余震特有の課題に対して合理的な意思決定のための有効な手段と考えられる。

余震は本震による被害発生の後に発生するため、本震によって一次的に損傷を受けた構造体に再び余震荷重が加わることによって普段より小さな荷重でも被害が大きくなることが考えられる。また、余震の震源によっては本震による地震動より余震の地震動が大きくなる可能性もあるため<sup>[6]</sup>、注意が必要である。実際に東北地方太平洋沖地震の場合、2011年4月7日のM7.2の余震によって建物の倒壊や死亡者が報告された。また余震の影響は電気や水道、交通等のライフラインにまで及び、断水や停電、道路の通行止めなどの被害をもたらす。日本建築学会の2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報<sup>[7]</sup>には、東北地方太平洋沖地震によって被害を受けた東北地方の電気、水道、都市ガスの復旧状況推移が示されている。その結果によると、電気の復旧が比較的速かったが、水道や都市ガスの復旧の開始時期は比較的遅く、

特に水道においては 2011 年 4 月 7 日の余震によって再び断水になったことが確認出来る。このような余震のライフラインへの被害は復旧活動や救援活動の遅れにも影響を与えるため、余震の影響を考慮してライフラインの復旧計画を立てる必要があると考えられる。しかし、中央防災会議による震災対策では余震の影響を考慮していないため改善の余地がある。

## 1.2 既往の研究

余震の確率評価手法は地震調査研究推進本部<sup>[8]</sup>により標準的な評価手法が提案されている。大きい地震ほど発生度数が少ないことを表す Gutenberg-Richter 式<sup>[9]</sup>(以下、GR 式と呼ぶ)と余震活動は時間とともに単調に減少していくことを表す改良大森式<sup>[10]</sup>(以下、MO 式と呼ぶ)を組み合わせた宇津<sup>[11]</sup>及び Reasenber and Jones 式<sup>[12]</sup>によって余震活動を確率論的に評価することが可能である。また余震記録の更新によってより正確な余震活動評価が出来る ETAS モデルもあるが、本研究は本震直後の復旧活動計画に活用することを目的としているため、本震情報のみで評価出来る宇津及び Reasenber and Jones 式による評価手法を採用する。

余震ハザードに関する研究は、余震が多かった 2004 年の新潟県中越地震以降から、検討されるようになった。壇ら<sup>[13]</sup>は余震を考慮した地震ハザード評価手法の確立のために、強震動の時系列シミュレーションを行った結果、サイトと震源の位置関係によっては、余震の考慮により地震ハザード評価結果が影響を受けることを確認した。宮腰ら<sup>[14],[15],[16]</sup>は余震を考慮した建物被害予測手法を提案している。組谷・高田<sup>[17]</sup>は本震被害と余震被害の重合という事象に関して、ある大きさの本震が発生したという条件のもとで、評価サイトに存在する建物の損傷状態がその後発生する余震によって、どのように遷移していくかについて検討し、理論式を提案した。なお、余震を考慮した場合と考慮しない場合とを比較し、損傷確率への余震の影響を確認した。

また従来では、本震発生直後に余震リスクの評価<sup>[18]</sup>を行うことに重点が置かれていたが、地震発生直後に余震ハザードを精度よく評価することは難しいことが指摘される。例えば、東北地方太平洋沖地震後の気象庁による余震発生確率<sup>[19]</sup>では三日以内の期間における最大震度 5 強以上の余震発生確率のみが発表されたが、場所や

頻度の情報がないため、具体的に避難や復旧活動の意思決定に活用することが難しかった。

地震調査研究推進本部<sup>[20]</sup>により全国を対象とした確率論的地震動予測地図の作成手法が発表されており、将来の本震発生による地震ハザードを対象としている。

海溝型巨大地震が発生すると海岸域においては余震だけでなく、津波に対する対策も必要である。既往の津波に対する対策は「津波避難ビル等に係るガイドライン」(平成 17 年 6 月、内閣府政策統括官(防災担当))があるが、2011 年東北地方太平洋沖地震の津波による建物の甚大な被害がきっかけとなり、国土交通省住宅局及び国土技術政策総合研究所では、「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について(技術的助言)」をまとめた<sup>[21], [22]</sup>。しかし津波荷重のみが対象となっており、本震発生直後の余震と津波の同時発生に対しては考慮されていない。

### 1.3 本研究の目的

本論文では将来発生する海溝型巨大地震の余震を評価するため、過去の海溝型巨大地震の余震記録を時間的及び空間的に分析して、確率論的余震発生モデルを提案する。実際に復旧活動に活用されるためには、多少ばらつきが存在しても本震直後にある程度の余震発生を予測する枠組みが必要であり、提案された確率論的余震発生モデルを用いて余震ハザード評価を行い、復旧活動計画に活用するための枠組みとして余震ハザードマップによる評価手法を提案する。最後に余震ハザード評価の応用例として、海溝型巨大地震の直後に発生する津波と余震の同時発生を考慮した津波と余震の荷重組み合わせ手法について提案する。

#### ・確率論的余震発生モデルの提案

まず、本研究では地震規模と発生回数の関係を表す Gutenberg-Richter 式と本震発生から経過時間と共に余震は減少していくことを表す改良大森式の組み合わせた宇津及び Reasenber & Jones 式を確率論的余震発生モデルの基本式として使用する。過去の余震記録を分析した結果、発生した余震の規模の比率が本震発生から時間経過によって変わる現象が確認出来た。この現象までを考慮するため、本研究では GR 式の  $b$  値を時間の関数としたモデルを提案する。この提案式を使用することで、本

震直後には大きい余震の比率が多く、時間経過によってその比率が小さくなる余震の特徴を反映することが出来る。また、東北地方太平洋沖地震後に観測された余震記録を含む、観測史上最大である  $M9$  規模の本震による  $M7$  規模を超える余震が含まれる地震記録によって、確率論的余震発生モデルのパラメータを提案する。

- ・ 確率論的余震ハザード評価への適用

続いて、東北地方太平洋沖地震に対する余震ハザード評価を行い、実際の観測値との比較により提案モデルの妥当性を確認する。なお、提案する確率論的余震発生モデルのパラメータに含まれている地震間誤差を評価するため、パラメータの感度解析を行う。次に、将来の海溝型巨大地震の余震への適用事例として、関東地震及び東海東南海連動型地震における確率論的余震ハザード評価を実施する。

- ・ 地震後の復旧活動計画のための確率論的余震ハザード評価の枠組みの提案

余震によって発生する繰り返し荷重による疲労問題のように構造に直接影響することもあると考えられるが、本研究では巨大本震後の復旧活動に余震による影響を考慮することを主な目的とする。巨大本震発生後には救助活動、避難活動、ライフラインの修復作業、建築土木構造物の復旧などの復旧活動が必要であり、このような復旧活動には余震の影響による二次被害も考慮しなければならない。例えば、救助活動が優先的に必要な場所の選定、避難場所や避難期間の決定、ライフラインや建築土木構造物の復旧作業の開始時期の決定などの復旧活動の意思決定に使用するためには、複数のサイトにおける余震ハザード評価結果による余震ハザードマップが有効である。そこで、中央防災会議<sup>[23]</sup>による地震防災の復旧期間区分を参考に、本震発生直後から3日間を応急活動期とし、本震発生後3日から30日間を復旧活動期と設定し、この期間内に本震 PGV を超える余震数に関する余震ハザードマップを提案する。

- ・ 耐津波設計における余震と津波の荷重組み合わせ手法の提案

海溝型巨大地震直後における余震と津波荷重の同時作用が考えられるため、限界状態設計法に基づいた信頼性解析を行い、合理的な余震と津波の荷重組み合わせ手

法を提案する。また、適用事例として 2011 年東北地方太平洋沖地震後の津波避難ビルを対象に解析を行い、耐津波設計に活用するための余震と津波の荷重組み合わせによる耐力・荷重係数を提案する。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成を図 1.3 に示す。

第 2 章では過去の地震記録を収集と分析を行い、本論文で用いる確率論的余震発生モデルのパラメータを提案する。第 3 章では第 2 章で提案した確率論的余震発生モデルを余震ハザード評価式に適用して、各パラメータの地震間誤差による感度解析を行う。また 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震ハザード評価を行い、実測値と比較することで提案モデルの適用性を確認する。なお、将来発生することが予測される巨大地震に提案手法を適用して、その余震を評価する。第 4 章では評価サイト毎の余震ハザード結果をまとめて、余震ハザードマップを作成する枠組みの提案とその活用法について考える。第 5 章では海溝型巨大地震直後の余震と津波の同時発生を考慮した余震と津波の荷重組み合わせ手法を信頼性解析に基づいて検討する。最後に、第 6 章で結論及び今後の課題を述べる。

## 2章 確率論的余震発生モデル及びパラメータの提案

- ・過去の余震記録選択
- ・GR式及びMO式を用いた時空間的分析
- ・地震間誤差を含む確率論的余震発生モデルのパラメータ提案

## 3章 提案モデルの余震ハザード評価への適用

- ・既往の地震ハザード評価手法を活用した確率論的余震ハザード評価手法
- ・2011年東北地方太平洋沖地震の余震記録によるモデル確認  
(感度解析及び実測値との比較)
- ・将来の海溝型巨大地震への適用による余震ハザード予測  
(関東地震、東海・東南海連動型地震への適用)

## 4章 余震ハザードマップの提案と応用例

- ・期間内に本震規模の地震動を超える余震数による余震ハザード評価の提案
- ・関東地震による首都圏の初期活動期及び応急活動期の余震ハザードマップの作成
- ・余震ハザードマップの応用例

## 5章 耐津波設計における余震と津波の荷重組み合わせの提案

- ・余震による荷重効果、津波による荷重効果、保有水平耐力の確率論的モデル化
- ・AFOSM手法による余震と津波荷重組み合わせ評価

図 1.3 本論文の構成

## 1 章の参考文献

- [1] 気象庁：海域で発生した主な地震の余震回数比較,  
[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011\\_03\\_11\\_tohoku/yoshinhikaku.pdf](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011_03_11_tohoku/yoshinhikaku.pdf), (2013/10/07 閲覧).
- [2] 気象庁：日本付近で発生した主な被害地震(平成 18 年～平成 25 年 8 月),  
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/higai/higai1996-new.html>, (2013/10/07 閲覧).
- [3] 気象庁：余震活動の状況(震央分布),  
[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011\\_03\\_11\\_tohoku/yoshin\\_teirei.png](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2011_03_11_tohoku/yoshin_teirei.png), (2013/10/07 閲覧).
- [4] 大辞林(第 2 版), 三省堂, <http://www.weblio.jp/content/%E4%BD%99%E9%9C%87>, (2013/10/07 閲覧).
- [5] 気象庁：余震について,  
[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/aftershocks/kiso\\_aftershock.html](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/aftershocks/kiso_aftershock.html), (2013/10/07 閲覧).
- [6] M. Hirose, T. Itoi and T. Takada : Empirical Prediction Model for Ground Motion Intensity due to Aftershocks, ICOSAR2013, pp.185-188, 2013.6.
- [7] 日本建築学会(2011), 2011 年東北地方太平洋沖地震被害調査速報.
- [8] 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 余震の確率評価手法について, 1998,  
<http://www.jishin.go.jp/main/yoshin2/yoshin2.htm> , (2013/12/27 閲覧).
- [9] Gutenberg, B. and C.F.Richter : Frequency of earthquakes in California, *Bull.Seism.Soc.Am.*,34,pp.185-188, 1944.10.
- [10] 宇津徳治:地震の時間的分布に関連する諸問題(その 1)地震の回数と時間間隔の分布について, 北海道大学地球物理学研究報告,22,pp.73-94, 1969.8.
- [11] 宇津徳治:地震活動総説, 東京大学出版会, 1999.
- [12] Reasenber, P.A. and L.M.Jones : Earthquake hazard after a mainshock in California, *Science*, 243, pp.1173-1176, 1989.3.
- [13] 壇 一男, 岡田康男, 花村正樹, 渡辺孝英 : 本震と余震の発生モデルの構築とそれに基づく強震動の時系列シミュレーションおよび地震ハザード解析, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, pp.138-141, 2006.11.

- [14] 宮腰 淳一, 島津 奈緒未, 具 典淑, 神原 浩, 山本 治貴 : 余震を考慮した建物被害予測手法に関する研究 : (その 1)全体概要と内陸地殻内地震の余震発生シナリオ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1061-1062, 2010.
- [15] 島津 奈緒未, 宮腰 淳一, 具 典淑, 神原 浩, 山本 治貴 : 余震を考慮した建物被害予測手法に関する研究 : (その 2)海溝型地震の余震発生シナリオ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1063-1064, 2010.
- [16] 具 典淑, 宮腰 淳一, 島津 奈緒未, 神原 浩, 山田 和樹 : 余震を考慮した建物被害予測手法に関する研究 : (その 3)被災建物の被害関数と建物被害予測事例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1065-1066, 2010.
- [17] 組谷彰太郎・高田毅士 : 余震発生を考慮した確率論的建物被害評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.637, pp.459-465, 2009.3.
- [18] 宇津徳治 : 地震学(第 3 版), 共立出版株式会社, 2007.
- [19] 気象庁, 「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」について(第 15 報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/201103131255.html>, (2012/03/15 閲覧).
- [20] 地震調査研究推進本部 : 全国地震動予測地図, 2009, [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/), (2013/12/06 閲覧).
- [21] 内閣府 : 津波避難ビル等に係るガイドライン、2005.
- [22] 国土交通省住宅局 : 津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について(技術的助言), <http://www.mlit.go.jp/common/000172861.pdf>, (2013/11/01 閲覧).
- [23] 中央防災会議 : 地方都市等における地震防災のあり方に関する専門調査会報告, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chihou/bousai/pdf/checklist.pdf>, 平成 24 年 3 月, (2014/01/31 閲覧).

## 第 2 章

# 確率論的余震発生モデル及びパラメータ の提案

### 2.1 はじめに

地震調査研究推進本部地震調査委員会は、過去の余震記録について統計的及び確率的な側面から分析し、余震の確率論的評価手法についての検討結果を発表した。この研究は本震—余震型の地震活動におけるいわゆる狭義の余震を対象とし、確率評価手法として Gutenberg-Richter 式と改良大森式の組み合わせによる式を採用している。また、本震発生時から時間経過を考慮してパラメータを更新して得られる結果を余震の震源予報として活用することを提案している。しかしこの余震確率評価手法のモデル化には東北地方太平洋沖地震のような M9 級の本震による余震記録は反映されていない。また本震発生後すぐに余震発生を予測して復旧活動計画に活用するためには、事前に過去の地震記録の分析を行い、余震発生を予測することで余震防災対策の枠組みを立てておく必要がある。

2 章では、東北地方太平洋沖地震後に得られた数多い余震記録を含んだ過去の海溝型巨大地震の余震記録を時間的及び空間的に分析し、本震直後の復旧活動計画に活用するための確率論的余震発生モデルを提案する。2.2 では余震の定義と本研究の対象範囲について述べる。2.3 では Gutenberg-Richter 式と改良大森式によって構成される、確率論的余震発生モデルについて説明する。2.4 では過去の海溝型巨大地震の余震記録を時間及び空間的に分析して、確率論的余震発生モデルのパラメータとして提案する。2011 年東北地方太平洋沖地震の余震記録を含む海溝型巨大地震の特徴をとらえるため、過去の本震記録の発生特徴や過去の余震記録の発生特徴を調査し、確率論的余震発生モデルのパラメータを求める。このようにして得られた各パラメ

ータを分析し、本震マグニチュードとの関係や本震発生からの経過時間との関係を調査し、将来発生する海溝型巨大地震の余震のための確率論的余震発生モデルを提案する。

## 2.2 本研究における余震の対象範囲

本研究で対象とする余震を明確にするため、図 2.1 に余震の分類を示す。一般に大きな地震が起こると、その直後から震源の周辺で地震が続発する。後続の地震が最初の地震より大きな場合、最初の地震を前震、後続の地震を本震と呼ぶ。 $M7$  を超える海溝型地震を前提とする巨大地震発生の事例として、1978 年 3 月 25 日択捉島沖の地震( $M7.3$ )の前震( $M7.0$ )と 2011 年東北地方太平洋沖地震( $M9.0$ )の前震( $M7.3$ )があるが、その割合は非常に少ない。一方、後続の地震が最初の地震より小さい場合、最初の地震を本震、後続の地震を余震と呼ぶ。

余震が発生する領域を余震域といい、本震で破壊された断層面とその周辺が含まれる。まれに余震域から飛び離れて起こる余震を誘発地震と呼び、余震域内で発生する場合を狭義の余震と呼ぶ。東北地方太平洋沖地震の余震分布を図 2.2 に示す。例えば、3 月 12 日に長野県で発生した  $M6.7$  の地震、3 月 15 日に静岡県で発生した  $M6.4$  の地震は誘発地震であり、狭義の余震ではない。また狭義の余震は本震による断層面のみを余震域とする場合と断層面を拡大した断層面(以下、拡大断層面と呼ぶ)を余震域とする場合に分けられる。本稿では離れた場所で発生する誘発地震の発生に対しては、これまでの研究において再現性がはっきりしない場合が多かったため、誘発地震<sup>1)</sup>は対象外とするが、誘発地震に対しても今後研究すべきであると考えている。

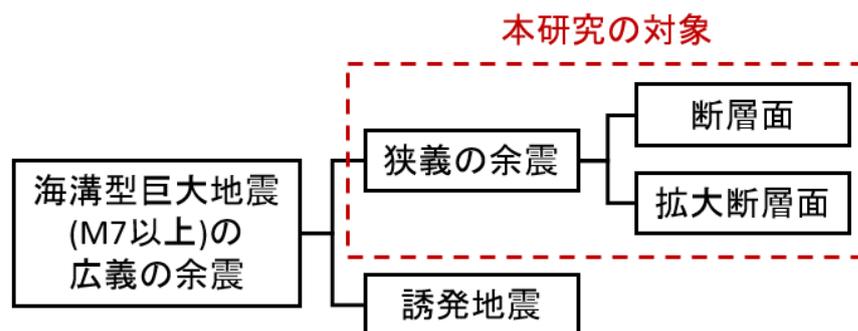


図 2.1 本研究の対象範囲

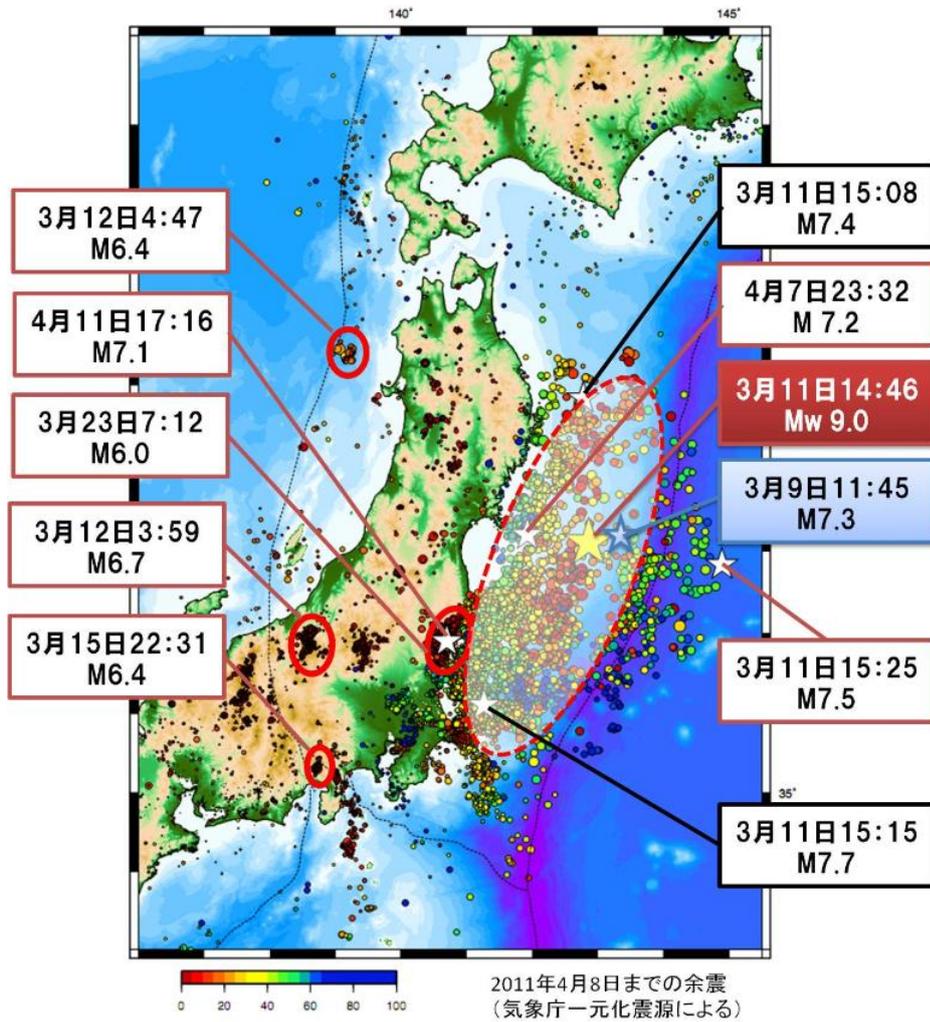


図 2.2 東北地方太平洋沖地震の余震分布(気象庁)

## 2.3 確率論的余震発生モデルの提案

本研究では地震の規模と発生頻度の関係を表す Gutenberg-Richter 式<sup>[2]</sup>と本震発生からの経過時間と共に余震数が減少することを表す改良大森式<sup>[3]</sup>を組み合わせた宇津<sup>[1]</sup>及び Reasenber & Jones<sup>[4]</sup>のモデルを基本とする確率論的余震発生モデルを提案し、過去の巨大地震の余震記録を分析してそのパラメータを提案する。

### 2.3.1 宇津及び Reasenber & Jones モデル

GR 式と MO 式を組み合わせた宇津<sup>[1]</sup>及び Reasenber & Jones<sup>[4]</sup>の確率論的余震発生モデルを以下に示す。

$$\lambda(t, M, M_m) = \frac{10^{a+b(M_m-M)}}{(t+c)^p} \quad (2.1)$$

ここで、 $t$  は本震発生からの時刻[日]、 $M$  は余震の規模、 $M_m$  本震マグニチュードであり、 $\lambda(t, M, M_m)$  は時刻  $t$  における規模  $M$  以上の余震の単位時間当たりの発生回数である。また  $a, b$  は定数であり、 $a$  は余震活動の活発さを、 $b$  は全余震中の小さい地震と大きい地震の数の比を表す。 $p, c$  は MO 式の定数であり、 $p$  は余震活動の時間的減衰を表す定数、 $c$  は本震発生直後の小余震が本震や大余震と重なって識別出来ない現象や停電などで観測中断などの複雑な様相を補正するための定数で、本研究では宇津<sup>[5]</sup>の見解を参考に  $0.1$ [日](=2.4 時間)と仮定する。

マグニチュード  $M_m$  の本震が起った時、本震発生から経過時間  $T_1$ [日]までの規模  $M$  以上の平均余震発生回数  $N(T_1, M, M_m)$  は、式(2.1)を積分して、次のように表せる。

$$\begin{aligned} N(T_1, M, M_m) &= \int_0^{T_1} \lambda(t, M, M_m) dt \\ &= 10^{a+b(M_m-M)} \frac{(T_1+c)^{1-p} - c^{1-p}}{1-p} \quad (p \neq 1) \end{aligned} \quad (2.2)$$

式(2.2)では  $a$  値と本震マグニチュード  $M_m$  の関係について示されていない。また  $b$  値が本震発生からの時間によらず一定となっており、時間経過による余震規模の割合

の変化は考慮出来ない。

### 2.3.2 提案モデル

本研究では本震マグニチュードから余震数を予測するため、 $a$  値を本震マグニチュード  $M_m$  の関数とし、また時間経過による余震規模の割合の変化を考慮するため、 $b$  値を本震からの経過時間  $T_1$  の関数と仮定し、実際の余震記録でその妥当性を検討する。また最小マグニチュードを  $M_{\min}$  (本研究では 4.0) とし、(2.2) 式の  $M$  に代入すると、式(2.3)が得られる。

$$N(T_1, M_{\min}, M_m) = 10^{a(M_m) + b(T_1)(M_m - M_{\min})} \frac{(T_1 + c)^{1-p} - c^{1-p}}{1-p} \quad (p \neq 1) \quad (2.3)$$

また地震の規模の確率分布を、GR 式の  $b$  値モデルでモデル化し、本震から経過時間  $T_1$  日までに余震マグニチュード  $M$  が  $m_i$  となる確率は、次式で表せる。

$$\begin{aligned} P(m_i | T_1) &= P(m_i - \Delta m/2 \leq M < m_i + \Delta m/2 | T_1) \\ &= \frac{N(T_1, m_i - \Delta m/2, M_m) - N(T_1, m_i + \Delta m/2, M_m)}{N(T_1, M_{\min} - \Delta m/2, M_m) - N(T_1, M_m + \Delta m/2, M_m)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで、 $\Delta m = 0.1$  とする。式(2.3)では最大余震の規模  $M_{\max}$  が本震マグニチュード  $M_m$  と同じであると仮定しているが、実際には前者の方が小さいことが知られている<sup>[1]</sup>。そこで次式のように本震マグニチュード  $M_m$  と最大余震の規模  $M_{\max}$  の差を  $D_1$  とし、以下では式(2.4)の  $M_m$  を  $M_{\max}$  に置き換える。

$$M_m = M_{\max} + D_1 \quad (2.5)$$

## 2.4 東北地方太平洋沖地震の余震記録の分析

東北地方太平洋沖地震の余震記録による今後の大地震の余震予測の可能性を調べるため、まず東北地方太平洋沖地震の余震記録と過去の太平洋沖で発生した本震記録を分析する。

### 2.4.1 東北地方太平洋沖地震の余震と過去本震との比較

東北地方太平洋沖地震の余震記録の時空間的特徴を分析するため、検討対象領域を決めて、そこで発生した東北地方太平洋沖地震の余震記録と過去の本震記録の分布を比較検討する。まず震源域の区分は、震源域は防災科学技術研究所の「太平洋プレートの震源断層を予め特定しにくい地震の地域区分」<sup>[7]</sup>を参考に A~H まで 8 つの領域に区分し、東北地方太平洋沖地震の余震震源分布図を図 2.3 に、過去の本震震源分布図を図 2.4 に示す。東北地方太平洋沖地震の余震記録は気象庁一元化处理震源リスト<sup>[10]</sup>を使用し、2011 年 3 月 11 日から同年 8 月 31 日までを観測期間とする。一方、過去の本震記録は気象庁の地震年報<sup>[11]</sup>を使用し、1923 年 1 月 1 日から 2009 年 12 月 31 日までを観測期間とする。震源深さはプレート境界地震を対象としたため 100km 以浅とし、地震マグニチュードは 3.5 以上とする。ただし、この地震の中には余震も混在しているため、建設省土木研究所の余震除去<sup>[6]</sup>を参考に、マグニチュード 6.0 以上の地震の発生後 90 日以内に、震央を中心とする次式<sup>[6]</sup>で表される面積  $A(\text{km}^2)$  の円内で発生した地震を余震とみなし、機械的に除去した。

$$\log_{10} A = M_m - 3.2 \quad (2.6)$$

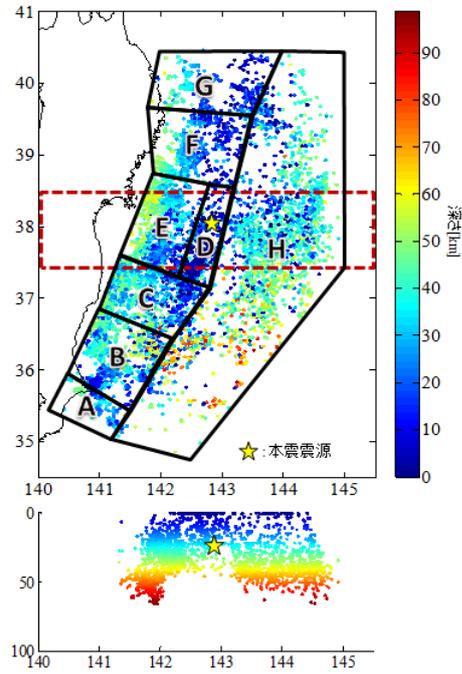


図 2.3 東北地方太平洋沖地震の余震震源分布図

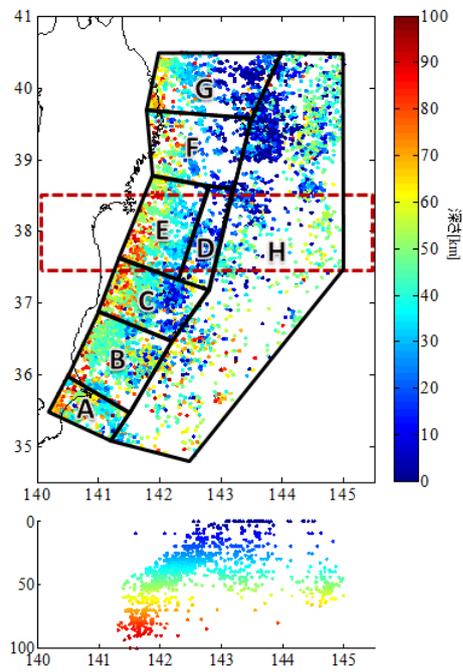


図 2.4 過去の本震の震源分布図

GR 式は元々余震を対象とした式ではなく、本震を対象とした経験式であるため、先に東北地方太平洋沖地震の余震に対する適用性を確認する。東北地方太平洋沖地震の余震記録を横軸にマグニチュード、縦軸に  $M$  以上の累積発生回数で表すと図 2.5 が得られる。この結果を見るとほぼ直線上に載ることが確認でき、余震データに対しても GR 式が成り立つことが分かる。図には領域毎に求めた結果も示しているが、各領域の面積が異なるため、GR 式の  $a$  値を直接比較することは出来ず、各領域の面積を考慮し単位面積当たりの  $a$  値( $\log(10^a/\text{面積})$ )で比較する必要がある。GR 式の  $b$  値は傾きに相当する値であり、どの領域においても同程度の値となっている。求められた  $a$  値、 $b$  値を表 2.1 に示す。同様に、過去の本震記録による各領域の GR 式を図 2.6 に、この結果から求められる GR 式の  $\log(10^a/\text{面積})$ 、 $b$  値を表 2.2 に示す。

以上の余震と過去の本震記録による GR 式の結果から、領域毎の余震と過去の本震の  $a$  値及び  $b$  値を比較し図 2.7、2.8 に示す。ただし、 $a$  値としては対象領域の面積を考慮した  $\log(10^a/\text{面積})$  を用いる。横軸は過去の本震の値、縦軸は東北地方太平洋沖地震の余震の値である。

図 2.7 の結果によると、 $a$  値に関しては余震と過去の本震において相関性があまり見られないが、図 2.7 の円で囲まれた領域 D、E では過去の本震の値より東北地方太平洋沖地震の余震の値が大きい特徴が確認された。この結果は東北地方太平洋沖地震の震源から近い領域 D、E では過去の本震発生は少なかったが、東北地方太平洋沖地震の余震は活発に発生したことを意味する。

図 2.8 の結果によると、 $b$  値は東北地方太平洋沖地震の余震記録と過去の本震記録に関わらず約 0.9 の値になることが確認出来る。この結果は余震、本震に関係なくこの領域の共通特徴であることを示唆する。また東北地方太平洋沖地震の震源から近い領域 D、E では、過去の本震の値より東北地方太平洋沖地震の余震の方が大きい傾向が見られ、本震震源から近い領域においては規模の大きい余震より、規模の小さい余震の割合が大きいことが考えられる。

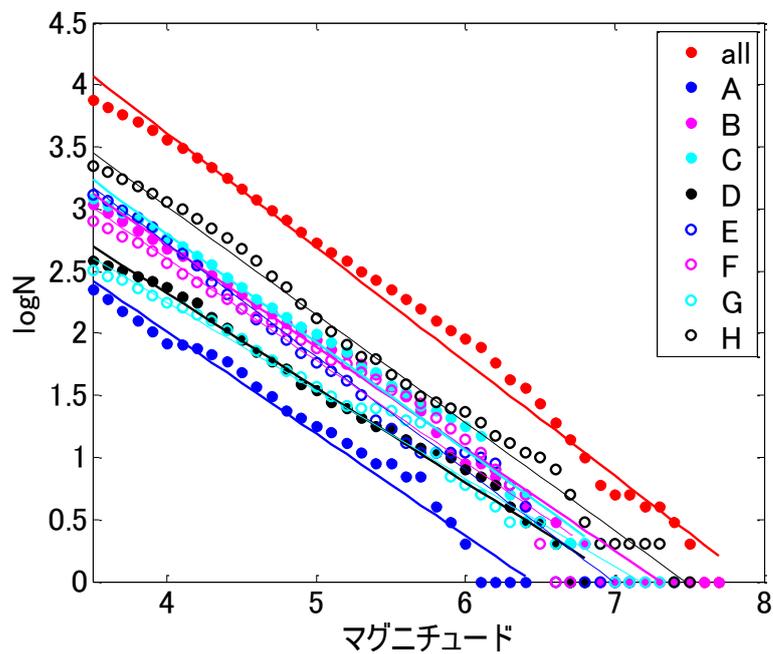


図 2.5 東北地方太平洋沖地震の余震記録による GR 式

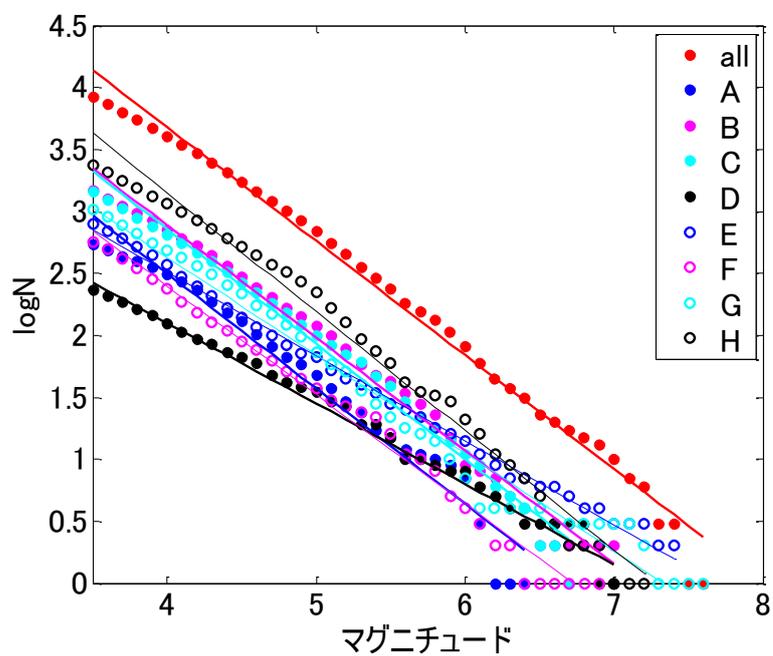


図 2.6 過去の本震記録による GR 式 (1923~2009)

表 2.1 東北地方太平洋沖地震の余震の  
GR 式のパラメータ

領域	N	余震(2011)		
		a	log(10 <sup>a</sup> /面積)	b
all	7560	7.3	2.1	0.92
A	227	5.3	1.5	0.82
B	1093	6.0	1.9	0.82
C	1226	6.3	2.2	0.87
D	382	5.4	1.6	0.76
E	1296	6.4	2.3	0.91
F	798	5.9	1.7	0.82
G	324	5.1	0.9	0.71
H	2214	6.5	1.5	0.87

表 2.2 過去の本震による  
GR 式のパラメータ

領域	N	本震(1923-2009)		
		a	log(10 <sup>a</sup> /面積)	b
all	8423	7.4	2.1	0.92
A	542	6.2	2.5	0.93
B	1462	6.5	2.4	0.91
C	1436	6.6	2.5	0.93
D	231	4.7	0.9	0.65
E	798	5.2	1.1	0.68
F	571	5.9	1.8	0.88
G	1029	5.8	1.6	0.79
H	2354	7.0	2.0	0.96

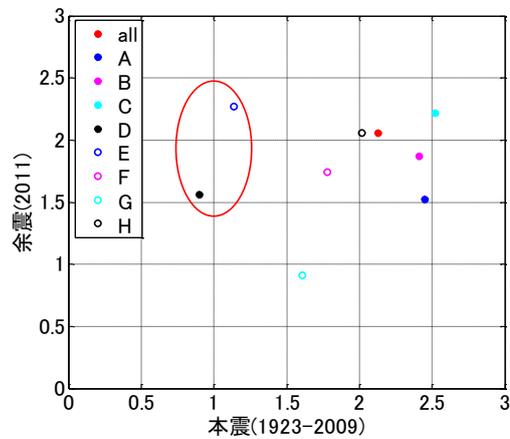


図 2.7 領域毎の余震と過去の本震の  
a 値比較

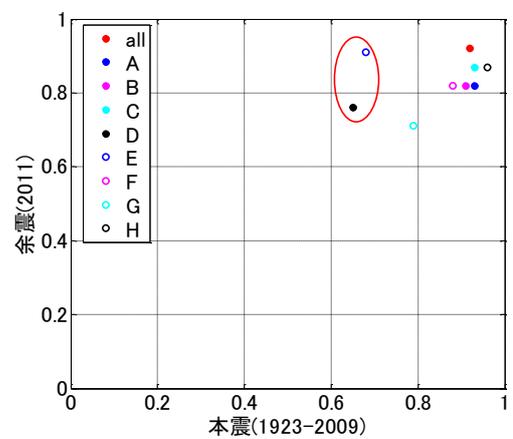


図 2.8 領域毎の余震と過去の本震の  
b 値比較

#### 2.4.2 東北地方太平洋沖地震の余震と過去の主な地震の余震の比較

東北地方太平洋沖地震の領域毎の余震記録を MO 式に当てはめると、図 2.9 の結果となり、この結果から求められる MO 式のパラメータを表 2.3 に示す。本震発生直後の余震発生率に関する  $K$  値は、本震マグニチュードや震源位置などの影響によって地震間のばらつきが非常に大きく、モデル化することが難しかった。一方、 $p$  値に関しては地震間のばらつきが比較的小さいことが確認できた。しかし、領域毎の余震発生の特徴は見られなかった。

次は、過去の主な地震の余震記録を調査し、東北地方太平洋沖地震の余震と比較することで余震の特徴を分析する。過去の主な地震の余震としては 1923 年から 2009 年までに、A から H までの領域において本震は発生した、マグニチュード 6.8 以上の地震 12 個を選択し、本震発生から 90 日以内に(2.6)式で表す余震域で発生した地震を余震として使用する。

過去の主な地震の余震記録を GR 式及び MO 式に当てはめると、図 2.10 及び 2.11 が得られ、この結果から求められる余震発生パラメータを表 2.4 に示す。

この結果と表 2.1 及び 2.3 の東北地方太平洋沖地震の余震記録を空間的に分析した結果の比較を行う。まず、GR 式によって比較的大きい  $a$  値が計算された領域 E に関して、過去の主な地震の余震における  $a$  値は非常に小さかった。また領域 E における  $b$  値は、東北地方太平洋沖地震では 0.91 であり、他の領域に比べて大きかったが、過去の地震では 0.68、0.72 と小さくなっており、共通的な特徴が確認出来なかった。MO 式の結果においても、表 2.4 より同様な本震震源でもばらつきの大きい  $p$  値結果となっており、領域の特性を導くことは難しかった。

過去の主な地震の余震の結果及び東北地方太平洋沖地震の余震による GR 式と MO 式による結果について空間的調査を行ったが、まだ領域毎の標本数が小さいことによって、余震発生に関する空間的特徴を導くことが出来なかった。そのため、2.5 節以降の余震発生は余震域内で一様と仮定する。

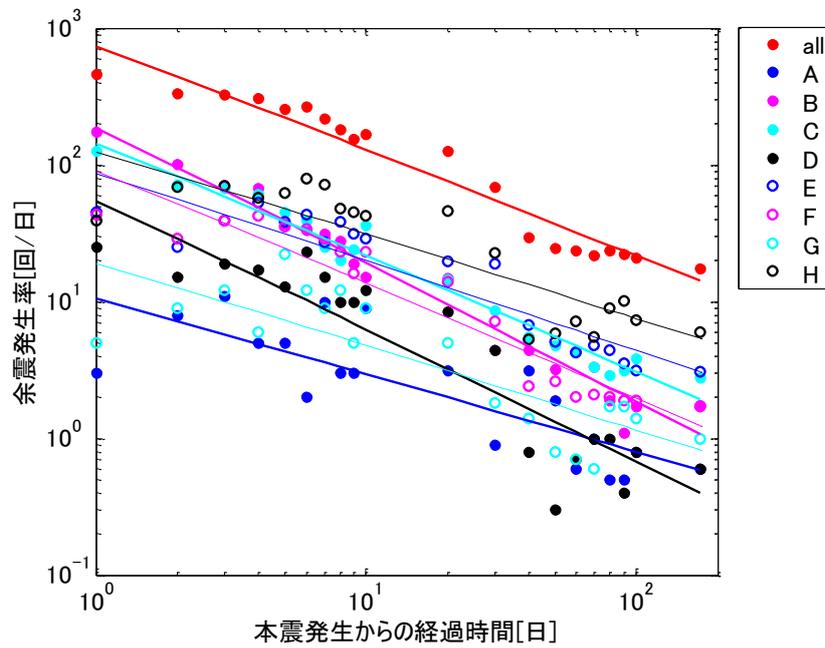


図 2.9 東北地方太平洋沖地震の余震記録による MO 式

表 2.3 東北地方太平洋沖地震の MO 式のパラメータ

領域	余震数	Aftershock(2011)		
		$K$	$K/Area$	$p$
All	7560	821	0.48E-2	0.79
A	227	11	0.19E-2	0.57
B	1093	215	1.6E-2	1.04
C	1226	161	1.4E-2	0.86
D	382	63	0.99E-2	0.98
E	1296	96	0.79E-2	0.67
F	798	104	0.75E-2	0.86
G	324	21	0.14E-2	0.63
H	2214	137	0.15E-2	0.63

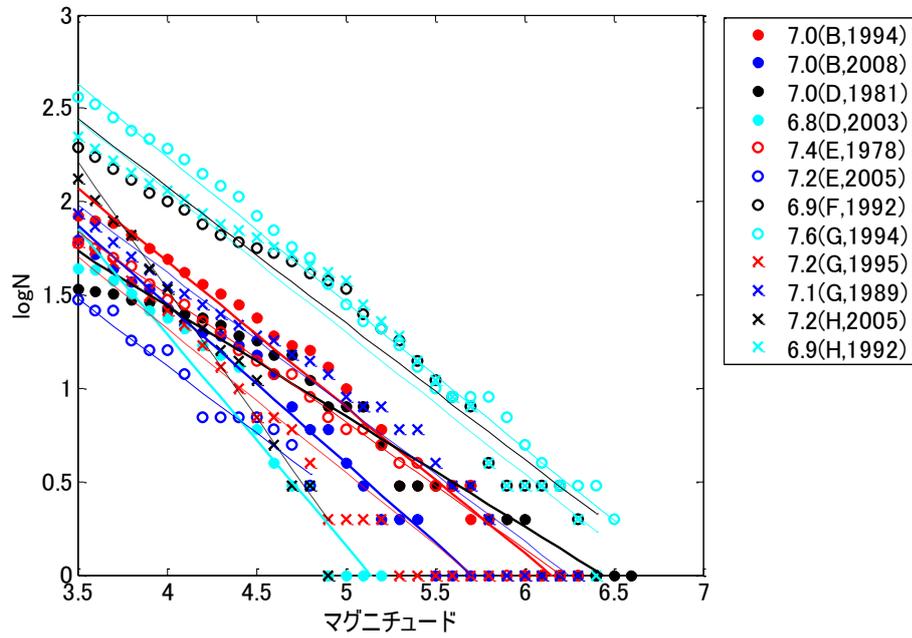


図 2.10 過去の主な地震の余震記録による GR 式

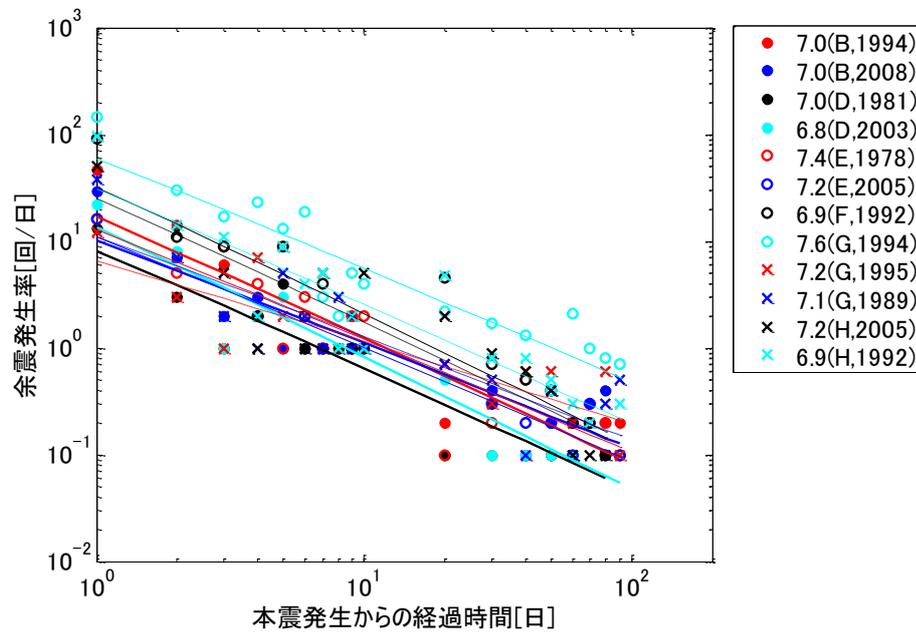


図 2.11 過去の主な地震の余震記録による MO 式

表 2.4 過去の主な地震の余震による GR 式及び MO 式のパラメータ

震源 位置	$M_m$	Date (GMT)	震源深さ [km]	$N$	GR 式			MO 式		
					$a$	$\log(10^a/\text{Area})$	$b$	$K$	$K/\text{Area}$	$p$
B	7.0	19820723	30	84	4.8	1.0	0.78	19	0.30E-2	1.18
B	7.0	20080508	50	62	4.9	1.1	0.85	11	0.17E-2	0.99
D	7.0	19810119	0	34	3.8	0.0	0.59	9	0.14E-2	1.14
D	6.8	20031031	33	44	5.8	2.2	1.1	15	0.38E-2	1.25
E	7.4	19780612	40	60	4.2	0.0	0.68	14	0.09E-2	1.06
E	7.2	20050816	42	30	4.0	0.0	0.72	12	0.12E-2	1.07
F	6.9	19920718	0	196	5.0	1.3	0.73	36	0.72E-2	1.23
G	7.6	19941228	0	310	5.4	1.0	0.78	66	0.26E-2	1.07
G	7.2	19950107	48	61	4.4	0.4	0.77	7	0.07E-2	0.78
G	7.1	19891102	0	87	4.5	0.6	0.72	12	0.15E-2	0.97
H	7.2	20051115	45	133	7.0	3.0	1.4	28	0.28E-2	1.20
H	6.9	19920718	0	223	5.1	1.4	0.76	34	0.68E-2	1.12

## 2.5 過去の余震記録によるパラメータの提案

将来の海溝型巨大地震の余震発生をモデル化するため、2011年東北地方太平洋沖地震 ( $M_m=9.0$ )、2003年十勝沖地震 ( $M_m=8.0$ ) を含む過去の巨大地震の余震の分析を行う。本研究は避難計画やライフライン修復など本震から約一カ月程度の比較的短期間の復旧活動のためのモデルを想定しているため、それよりも長い本震発生から90日以内<sup>[6]</sup>を余震評価期間と仮定する。そのほかの余震条件として、震源深さ100km以浅、マグニチュード下限は  $M_{\min}=4.0$  とする。ただし、図1.1に示した余震の積算回数では  $M5.0$  以上の余震を対象としているが、 $M5.0$  以上の余震記録ではサンプル数が少ないため、以下の余震発生モデル化では  $M_{\min}=4.0$  とする。図2.12、2.13に対象とする海溝型巨大地震の余震震源分布を示す。

### 2.5.1 余震記録

2011年東北地方太平洋沖地震の余震は本震発生以降に国土地理院で発表した断層面<sup>[8]</sup>と気象庁の余震活動の領域について<sup>[9]</sup>を参考に作成した拡大断層面を余震域とし、震源記録は気象庁一元化処理震源リスト<sup>[10]</sup>を用いる。

その他の地震の余震域は建設省土木研究所によって本震の震源を中心とする式(2.6)で表される面積  $A[\text{km}^2]$  の円内とし、震源記録は気象庁の地震年報<sup>[11]</sup>を用いる。

2003年十勝沖地震の余震は本震発生以降に国土地理院で発表した断層面<sup>[12]</sup>を参考に式(2.6)より求めた余震域面積を考慮した拡大断層面を余震域とし、震源記録は気象庁の地震年報<sup>[11]</sup>を用いる。

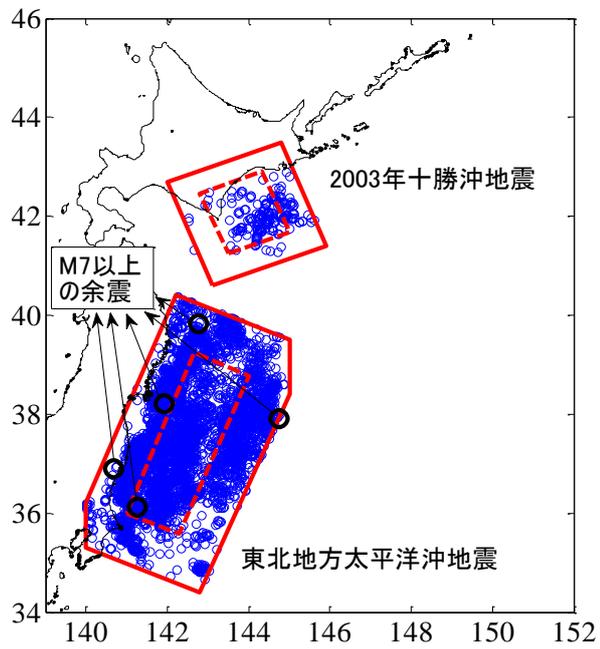


図 2.12 東北地方太平洋沖地震及び十勝沖地震の余震分布  
(点線:断層面, 実線:拡大断層面)

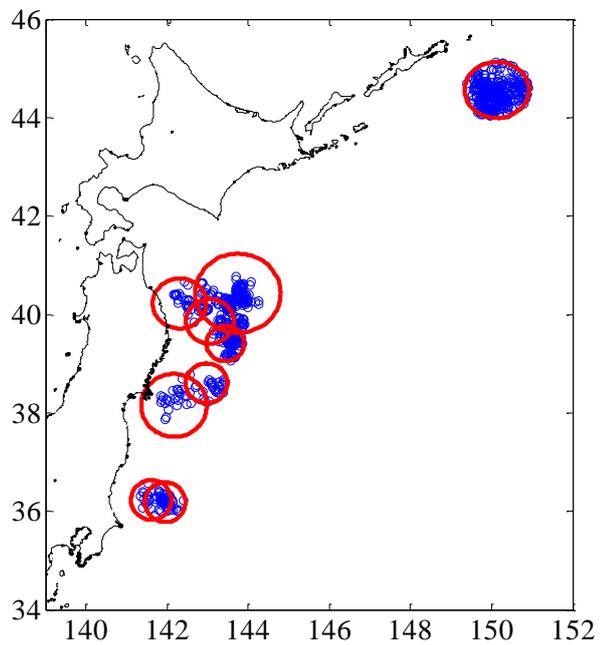


図 2.13 その他の地震の余震分布

表 2.5 過去の本震の余震発生パラメータ( $T_1=90, M_{\min}=4.0$ )

$M_m$	本震日付 (GMT)	本震震源		余震発生パラメータ				参 考
		経度	緯度	$N$	$b(90)$	$p$	$D_1$	
9.0	20110311	142.9	38.1	3123	0.99	0.86	1.3	
7.0	20080507	141.6	36.2	27	0.91	0.84	1.2	
8.0	20030925	144.1	41.8	212	0.84	1.02	0.9	
7.3	19951203	150.1	44.6	329	0.89	0.97	0.3	
7.2	19950106	142.3	40.2	26	0.7	0.76	1.0	
7.6	19941228	143.7	40.4	191	0.8	0.93	1.1	
6.9	19920718	143.4	39.4	100	0.8	1.09	0.5	
7.1	19891101	143.1	39.9	34	0.74	0.94	0.8	
6.7	19870206	141.9	36.9	NA	0.88	0.91	1.1	[13]
7.1	19840806	132.2	32.4	NA	1.03	1.00	2.3	[13]
7.0	19820723	142.0	36.2	49	0.83	0.98	0.8	
7.4	19780612	142.2	38.2	30	0.69	0.86	1.1	
7.9	19680516	143.6	40.7	NA	0.90	1.00	0.4	[14]
7.5	19640616	139.2	38.4	NA	1.00	1.40	1.4	[14]
7.0	19610226	131.9	31.6	NA	0.75	1.00	1.7	[14]
6.8	19610112	142.3	36.0	NA	0.80	1.30	0.2	[14]
7.5	19600320	143.5	39.8	NA	0.85	1.30	0.8	[14]
8.1	19520304	143.9	42.2	NA	0.80	1.10	1.1	[14]
8.1	19461220	135.6	33.0	NA	0.70	1.00	0.9	[14]
8.0	19441207	136.2	33.7	NA	0.70	1.10	1.3	[14]
7.7	19381105	141.6	37.1	NA	0.65	1.20	0.1	[14]
7.1	19380523	141.4	36.7	NA	0.80	1.10	1.2	[14]
8.3	19330302	144.7	39.1	NA	1.10	1.40	1.6	[14]

ここで、 $N$ は余震域内で90日間発生した $M4$ 以上の総余震数である。 $b(90)$ は本震発生後90日間のGR式の $b$ 値であるが、[13], [14]では期間がそろっていないため注意が必要である。 $p$ は改良大森式の減衰係数、 $D_1$ は本震マグニチュードと最大余震マグニチュードの差で、余震ハザード計算の時、最大余震を決める時に用いられる。

## 2.5.2 本震マグニチュードと各パラメータの関係

以上で取り上げた過去の海溝型地震の余震記録を用いて得られた提案モデルのパラメータを表 2.5 に示す。また既往の論文<sup>[13],[14]</sup>で求められた  $M6.7$  以上の海溝型地震のパラメータも合わせて示す。

表 2.5 から得られたパラメータと本震マグニチュード( $M_m$ )との関係を図 2.14~2.18 に示す。この関係を回帰分析し、余震発生モデルのパラメータを提案する。まず余震域面積( $A_{after}$ )は式(2.6)を用いたその他の地震の余震域と 2011 年東北地方太平洋沖地震及び 2003 年十勝沖地震の拡大断層面の面積を回帰近似すると、式(2.7)のように表せる。

$$\log_{10} A_{after} = 0.778M_m - 1.60 \quad (2.7)$$

(2.7)式から本震マグニチュードによる拡大断層面の面積が計算されると、次は拡大断層面の位置を設定する必要がある。基本的に拡大断層面は本震による断層面を調べ、本震断層面の各辺を等間隔で外側に広げって拡大断層面の面積になるように設定する。

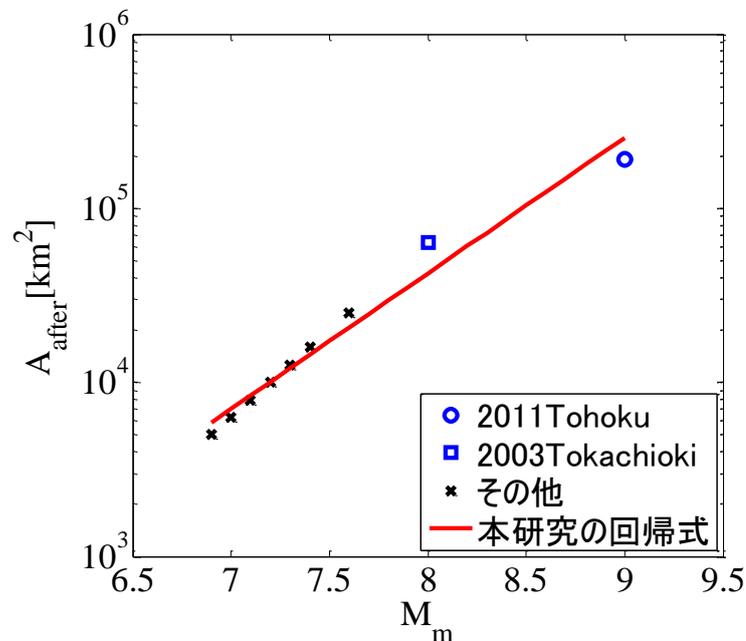


図 2.14 余震域と  $M_m$  の関係

$M_{\min}=4.0$  以上の総余震数  $N$  は、図 2.15 の結果から次式のように回帰近似でき、観測値との常用対数での誤差の標準偏差は 0.36 である。

$$\log_{10} N(90, 4.0, M_m) \equiv 0.88M_m - 4.51 \quad (2.8)$$

ただし、文献[13], [14]では  $M_{\min}$  が 4.0 でないため  $N$  を利用出来ないが、付録 A に既知の  $b(T_1)$ 、 $M_m$ 、 $D_1$  から総余震数  $N$  を求め、図 2.15 と比較した結果を示す。

式(2.8)によって  $N(90, 4.0, M_m)$  と本震規模  $M_m$  の関係が導かれ、これを用いると式(2.3)を次式で表すことが出来る。

$$N(T_1, M_{\min}, M_m) = N(90, 4.0, M_m) \frac{(T_1 + c)^{1-p} - c^{1-p}}{(90 + c)^{1-p} - c^{1-p}} \quad (p \neq 1) \quad (2.9)$$

$b(90)$ 、 $p$ 、 $D_1$  は  $M_m$  との関係が見られず、以下のような平均値と標準偏差を持つ正規分布としてモデル化する。

$$\bar{b}(90) = 0.83, \sigma_{b(90)} = 0.12 \quad (2.10)$$

$$\bar{p} = 1.05, \sigma_p = 0.17 \quad (2.11)$$

$$\bar{D}_1 = 1.0, \sigma_{D_1} = 0.5 \quad (2.12)$$

また各パラメータの回帰誤差間の相関関係について表 2.4 に示す。

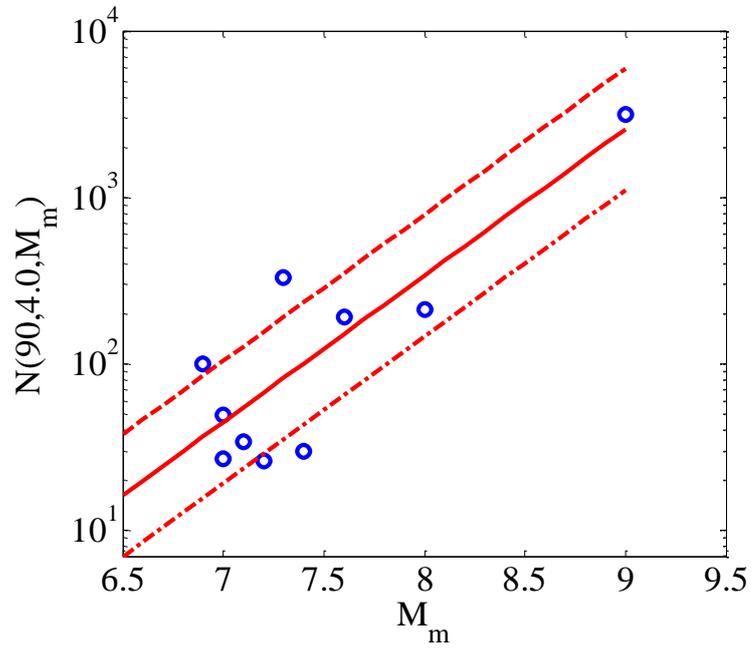


図 2.15 総余震数( $N$ )と  $M_m$  の関係

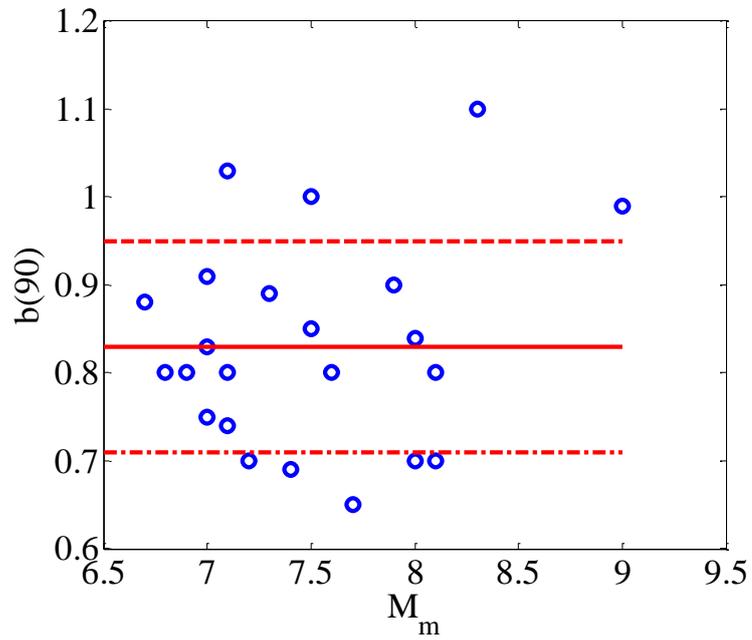


図 2.16  $b(90)$ 値と  $M_m$  の関係

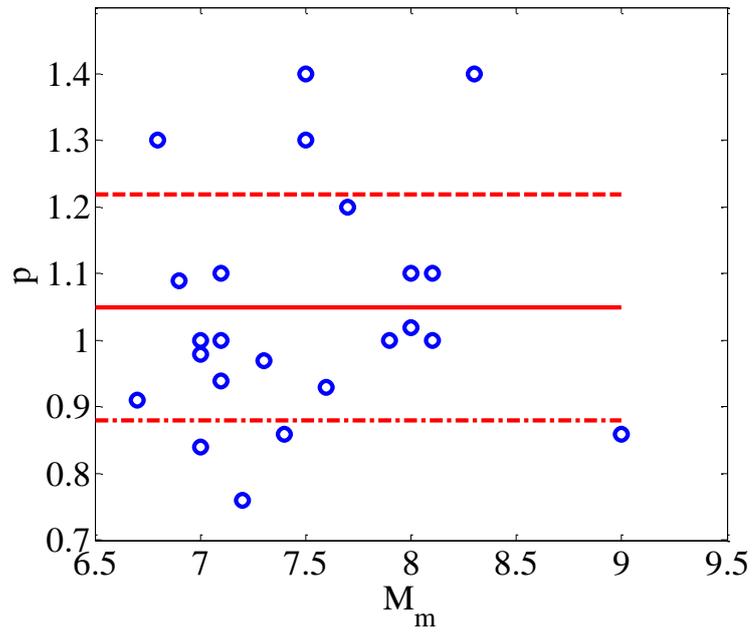


図 2.17  $p$  値と  $M_m$  の関係

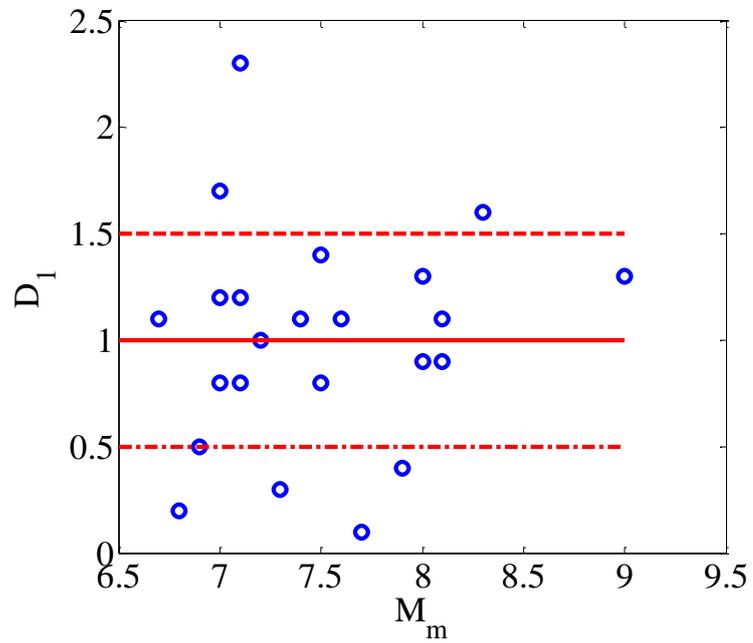


図 2.18  $D_1$  値と  $M_m$  の関係

表 2.4 各パラメータ間の共分散行列

	$\log_{10}N(90, 4.0, M_m)$	$b(90)$	$p$	$D_1$
$\log_{10}N(90, 4.0, M_m)$	0.13	0.02	0.02	-0.07
$b(90)$		0.01	0.01	0.02
$p$			0.03	-0.003
$D_1$				0.26

表 2.5 各パラメータ間の相関係数

	$\log_{10}N(90, 4.0, M_m)$	$b(90)$	$p$	$D_1$
$\log_{10}N(90, 4.0, M_m)$		0.37	0.31	-0.40
$b(90)$			0.27	0.38
$p$				-0.03
$D_1$				

表 2.5 によると、 $\log_{10}N$  と  $b(90)$ 、 $\log_{10}N$  と  $p$ 、 $b(90)$  と  $p$ 、 $b(90)$  と  $D_1$ 、 $p$  と  $D_1$  の間では相関係数 0.4 未満の弱い相関がみられる。 $\log_{10}N$  と  $D_1$  の間において相関係数-0.4 程度の負の相関が確認できたが、これも強い相関とは言えないため、以下の検討ではこれらのパラメータは独立と仮定する。

### 2.5.3 本震発生からの経過時間による $b$ 値の変化

巨大地震後に発生する規模の大きい余震のほとんどが本震発生直後に集中的に発生することが知られており、本震発生からの経過時間によって発生する余震の規模の変化、すなわち GR 式における  $b$  値の変化を調査する。図 2.19 には東北地方太平洋沖地震の本震発生から経過時間  $T_1=1, 7, 90$  日間の GR 式を示す。図 2.19 によると、本震発生から時間  $T_1$  が経過することで、 $M7$  程度の余震数はあまり増加しないのに対し、規模の小さい余震の数は増加することで  $y$  切片が大きくなり、結果的に直線の傾きである  $b$  値が大きくなることが確認出来る。同様な手法で過去の主な地震の余震記録を分析し、その結果を図 2.20 に示す。この結果により、本震発生からの時間経過と共に  $b(T_1)$  値が大きくなること、つまり大規模の余震の割合が本震発生から時間経過と共に小さくなることが確認でき、得られた結果を回帰分析すると次式で表現することができる。

$$b(T_1) = 0.068 \log_{10}(T_1) + 0.70 \quad (2.13)$$

式(2.13)を用いることにより、既往の確率論的余震発生モデル(2.1)では一定な  $b$  値を使用したため考慮出来なかった本震発生からの経過時間による余震規模の変化を考慮することができるようになった。

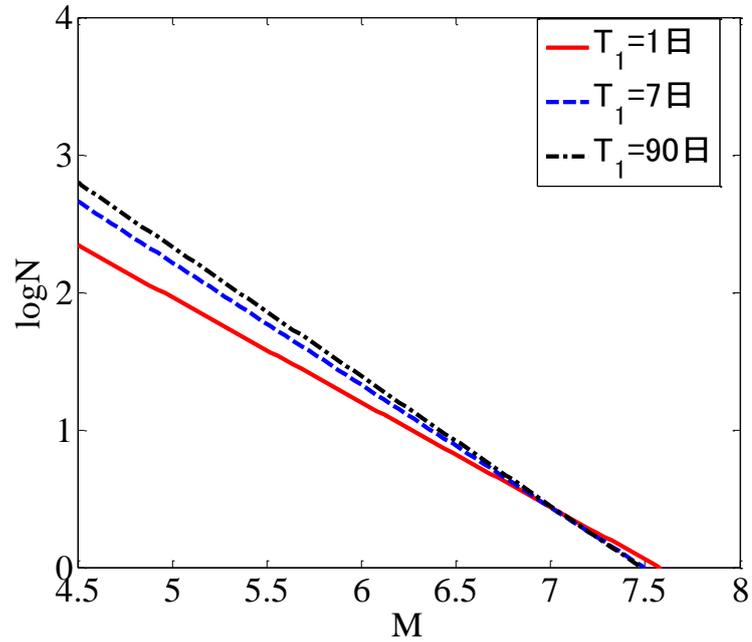


図 2.19 東北地方太平洋沖地震の本震後の経過時間  $T_1$  毎の GR 式

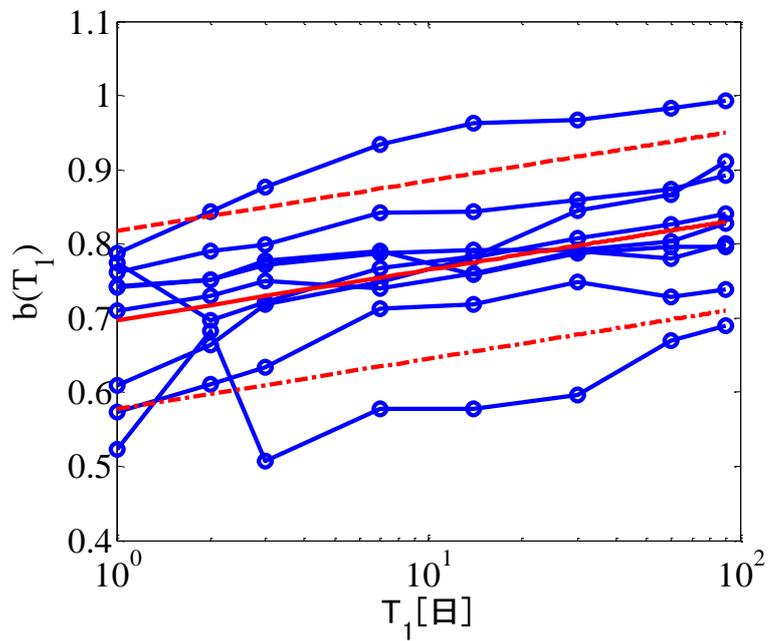


図 2.20 本震後の経過時間  $T_1$  と  $b(T_1)$  の関係

## 2.6 まとめ

本章では、まず 2.2 において、余震の定義と本研究の対象範囲について明らかにした。本研究における対象余震条件は以下のようである。

- ・本震は海溝型巨大地震とする。
- ・狭義の余震を対象とし、誘発地震は対象外とする。
- ・余震域は本震断層面及びそれを拡張した拡大断層面とする。

2.3 では、Gutenberg-Richter 式と改良大森式によって構成される、確率論的余震発生モデルを提案した。

2.4 では、東北地方太平洋沖地震の余震記録と過去の太平洋沖で発生した地震記録を比較調査し、以下の結果を得た。

- ・GR 式の  $b$  値は過去の本震記録、余震記録を問わず約 0.9 であった。
- ・ $K$  値に関しては本震マグニチュードや震源位置などの影響で地震間ばらつきが非常に大きかった。
- ・ $p$  値は地震間のばらつきが小さいことが確認できた。

2.5 では、東北地方太平洋沖地震を含む過去の太平洋プレートで発生した 23 個の海溝型巨大地震を本震とする余震記録を時空間的に分析して、提案した確率論的余震発生モデルにおけるパラメータと本震マグニチュード及び本震発生からの経過時間の関係を分析し、以下の知見を得た。

- ・余震域の面積と本震マグニチュードの間では比例関係が、総余震数( $N$ )と本震マグニチュード( $M_m$ )の間では対数関数によってモデル化することが出来た。
- ・本震マグニチュード  $M_m$  と  $b(90)$ ,  $p$ ,  $D_I$  の間では相関性が見られず、地震間誤差を考慮して平均値と標準偏差を用いてモデル化を行った。
- ・ $b$  値は本震発生からの経過時間と共に大きくなることが確認して、本震発生からの経過時間の関数としてモデル化した。

## 2 章の参考文献

- [1] 宇津徳治:地震活動総説, 東京大学出版会, 1999.
- [2] Gutenberg, B. and C.F.Richter : Frequency of earthquakes in California, *Bull.Seism.Soc.Am.*,34,pp.185-188, 1944.10.
- [3] 宇津徳治:地震の時間的分布に関連する諸問題(その1)地震の回数と時間間隔の分布について, 北海道大学地球物理学研究報告,22,pp.73-94, 1969.8.
- [4] Reasenberg, P.A. and L.M.Jones : Earthquake hazard after a mainshock in California, *Science*, 243, pp.1173-1176, 1989.3.
- [5] 宇津徳治 : 地震学(第3版), 共立出版株式会社, 2007.
- [6] 建設省土木研究所地震防災部振動研究室(1983) : 前・余震の頻度および規模に関する調査, 土研資料, 第1995号.
- [7] 防災科学技術研究所 : 全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討, 2005.8.
- [8] 国土地理院,東北地方太平洋沖地震の断層モデル,  
<http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index.html> (2011/08/31 閲覧).
- [9] 気象庁ホームページ, 余震活動の領域について,  
[http://www.jma.go.jp/jma/menu/yoshin\\_area.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/menu/yoshin_area.pdf) (2011/08/31 閲覧).
- [10] 防災科学技術研究所ホームページ, 気象庁一元化処理震源リスト,  
<http://www.hinet.bosai.go.jp/REGS/JMA/list/> (2011/08/31 閲覧).
- [11] 気象庁,「地震年報」(2009年).
- [12] Yagi, Y. : Source rupture process of the 2003 Tokachi-oki earthquake determined by joint inversion of teleseismic body wave and strong ground motion data, *Earth Planets Space*, 56, pp.311-316, 2004.2.
- [13] Guo, Z. and Y.Ogata : Statistical relations between the parameters aftershocks in time, space and magnitude, *J.Geophys.Res.*, pp.2857-2873, 1997.2.
- [14] Utsu, T. : Aftershocks and earthquake statistics(1), *J.Fac.Sci.,Hokkaido Univ.*, Ser.7, 2, pp.129-195, 1969.8.

## 第3章

# 提案モデルの余震ハザード評価への適用

### 3.1 はじめに

3章では、2章で提案した確率論的余震発生モデルを用いて余震ハザード評価を行い、提案パラメータに含まれている地震間誤差の評価のため感度解析を行う。また、提案モデルの適用性を確認するため、2011年東北地方太平洋沖地震に適用して計算された余震ハザード結果と評価サイト毎の地震動の観測記録とを比較分析する。その後、将来の海溝型巨大地震が発生した際の余震発生を評価するため、関東地震と東海東南海地震を適用事例と仮定し、提案余震ハザード評価手法による結果を評価する。ここでは、1923年関東地震及び1854年安政地震と同程度の本震が将来発生することを想定して余震ハザード評価を行う。

### 3.2 余震ハザード評価式

地震ハザード評価とは、地点における地震動の強さとそれを特定の期間内に超える確率(あるいは超過回数)の関係を算定するものである。本研究では地震ハザード評価を海溝型巨大地震後の余震に適用し、余震ハザード評価を行う。規模  $M_m$  の本震が発生してから  $T_1$  日間に地震動の強さ  $Y_{surf}$  が  $y$  を超える平均余震発生回数は本震を対象とした地震ハザード評価手法<sup>[1]</sup>を援用し、次式によって求めることが出来る。

$$\begin{aligned} & N(Y_{surf} > y | T_1, M_m) \\ & = N(T_1, M_{min}, M_m) \sum_i \sum_j P(Y_{surf} > y | m_i, r_j) P(m_i | T_1) P(r_j | m_i) \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここで、 $N(T_1, M_{min}, M_m)$  は対象とする余震域における  $T_1$  日間の最小マグニチュード ( $M_{min}=4.0$ ) 以上の平均余震発生回数であり(2.3)式で計算する。 $P(Y_{surf} > y | m_i, r_j)$  は余震の規模が  $m_i$ 、距離が  $r_j$  の時に地震動の強さ  $Y_{surf}$  が  $y$  を超える条件付確率であり、地震動強さは応答スペクトルや他の指標を適用することも可能だが、ここでは最大速度(PGV)を適用する。この地震動の強さ  $Y_{surf}$  を計算する時には(3.2)式に示した司・翠川(1999)<sup>[2]</sup>の距離減衰式を使用する。

$$\begin{aligned} \log_{10} Y_{bed} &= \hat{b} - \log(X + \hat{c}) - 0.002X \\ \hat{b} &= 0.58M + 0.0038D - 1.31 + \varepsilon \\ \hat{c} &= 0.0028 \cdot 10^{0.50M} \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで、地震タイプはプレート間地震と仮定、 $Y_{bed}$  は工学的基盤での PGV[cm/s]、 $M$  は余震のマグニチュード、 $X$  は震源最短距離[km]、 $D$  は震源深さ[km]、 $\varepsilon$  は誤差を表す確率変数であり、その標準偏差を常用対数で 0.23 とする。 $X$  は宇津<sup>[3]</sup>の式(3.3)を用いて断層長  $L$ [km] を想定し、震源を中心とした半径  $1/2L$ [km] の球面から観測点までの距離として計算する<sup>[4]</sup>。なお、震源距離が  $1/2L$ [km] よりも短い場合、一律で震源最短距離  $X$  を 3km と設定する。

$$\log_{10} L = 0.5M - 1.85 \quad (3.3)$$

また地盤増幅を考慮した PGV は以下の式で求めることが出来る。

$$Y_{surf} = Y_{bed} \cdot R \quad (3.4)$$

$$\log_{10} R = 1.83 - 0.66 \log_{10} AVS30 \quad (3.5)$$

ここで、 $Y_{surf}$  は地表面での PGV[cm/s]、 $R$  は地盤増幅率、 $AVS30$  は地盤の深さ 30m までの平均 S 波速度[m/s]である。(3.5)式を  $100 < AVS30 < 600$  においてグラフで表すと図 3.2 のようになり、 $AVS30$  が大きくなると地盤増幅率は小さくなる事が分かる。

$P(m_i | T_1)$  は余震域で発生する地震の規模の確率分布関数であり、式(2.4)の GR 式の  $b$  値モデルで計算する。

余震域の面積は本震発生後に気象庁などで発表される本震マグニチュードを用いて式(2.7)の本震マグニチュードと余震域面積の関係から求め、余震域の位置は本震断層面の各辺を等間隔で外側に広げて拡大断層面の面積になるように設定する。本研究における拡大断層面の位置設定方法について図 3.1 に示す。まず、本震による断層面を調べ、本震断層面を等間隔の矩形メッシュに分割する。本研究ではメッシュの 1 辺長さを約 10km とした。次に、本震規模によって(2.7)式から拡大断層面の面積を計算し、本震の断層面を中心として各辺を同じ個数のメッシュだけ外側に拡張して拡大断層面の面積になるように設定する。本震による断層面の深さが浅い場合や本震マグニチュードが大きいため本震断層面を広げた拡大断層面の深さが地表面より高くなる場合が考えられるが、そのような場合には、拡大断層面の最も浅い深さを一律に 3km と仮定する。このように設定した拡大断層面の各メッシュの重心において余震が発生し、その活動は一樣であると仮定する。 $P(r_j | m_i)$  は規模が  $m_i$  の条件での距離の確率関数であり、拡大断層面のメッシュ上で一樣に分布すると仮定したため、各メッシュ上における発生確率を 1/総メッシュ数とする。

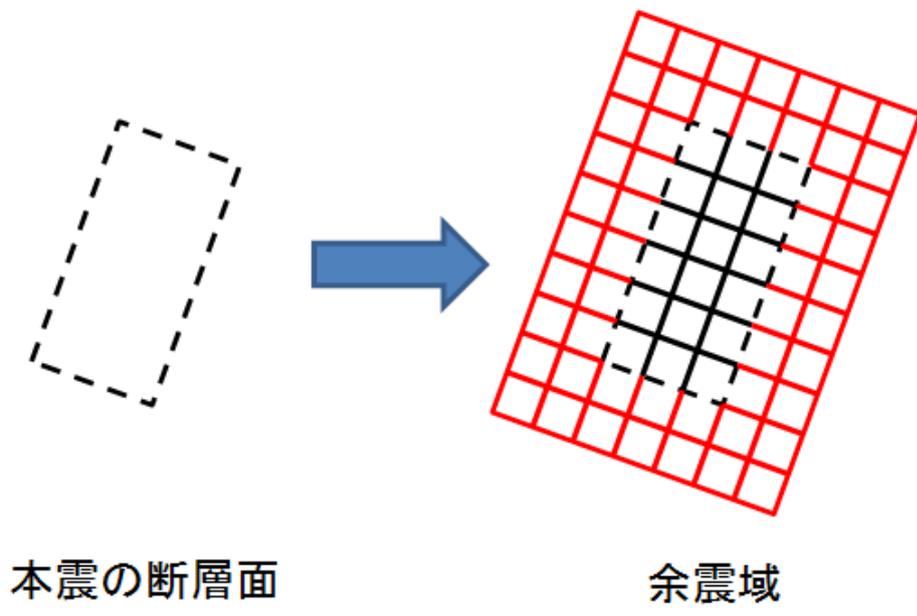


図 3.1 拡大断層面(余震域)の位置設定方法

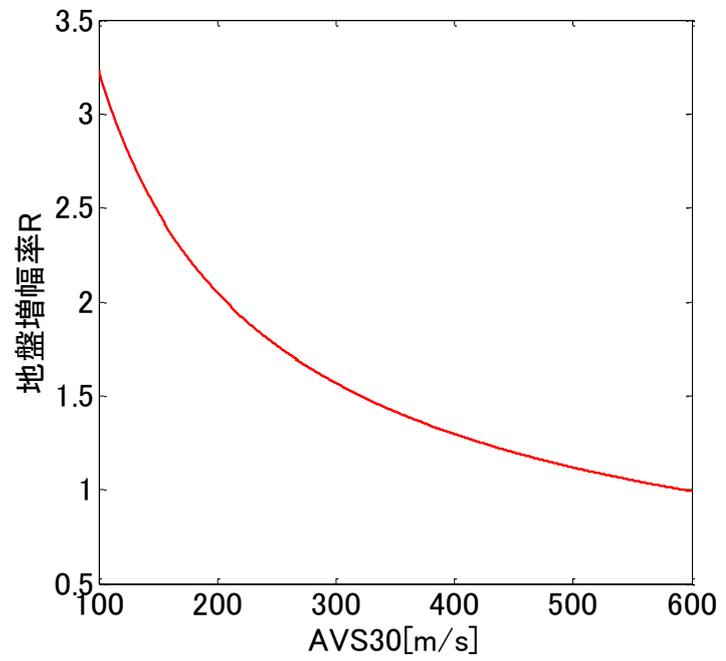


図 3.2 地盤増幅率  $R$  と AVS30 との関係

### 3.3 提案モデルの適用性確認

2.5 節で提案したパラメータを用いて、東北地方太平洋沖地震の余震に対する最大速度(PGV)のハザード曲線を作成し、提案モデルの適用性を確認する。解析モデルの余震域と観測サイト位置を図 3.2 に、観測サイトの諸元を表 3.1 に示す。

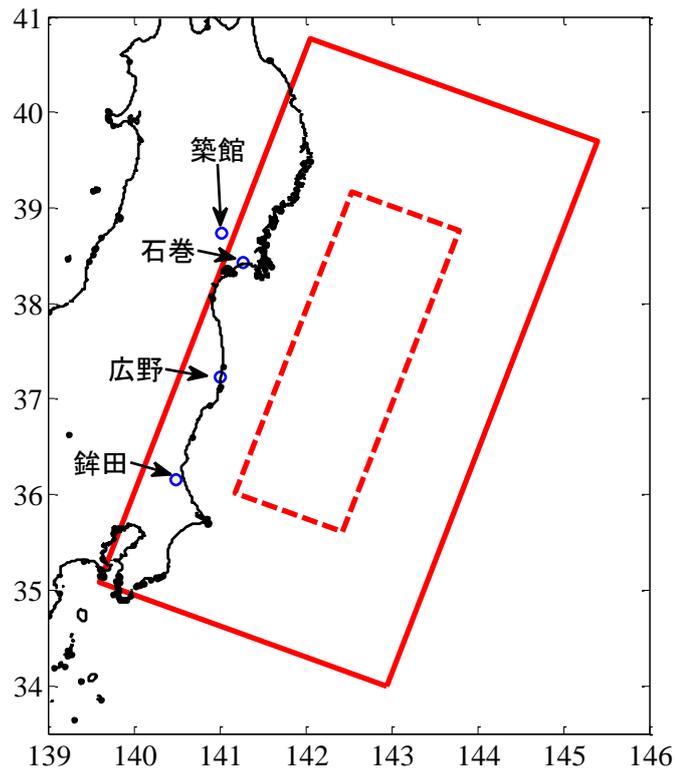


図 3.3 東北地方太平洋沖地震の余震域とサイト

表 3.1 観測サイトの諸元

サイト (K-NET 記号)	経度	緯度	AVS30 [m/s]
石巻(MYG010)	141.28	38.43	262
広野(FKS010)	141.00	37.23	409
銚田(IBR013)	140.49	36.16	265
築館(MYG004)	141.02	38.73	430

### 3.3.1 余震ハザード解析条件

余震ハザードは3.2節の式(3.1)を使用して計算する。拡大断層面を約10km間隔で分割したメッシュの節点において余震は一様に発生すると仮定し、余震の規模はM4.0から $M_m - D_1$ まで0.1間隔として設定し、全ての結果を合計することで余震ハザードを求める。

### 3.3.2 パラメータの感度解析

2.5節で提案したパラメータ( $\log_{10}N(90, 4.0, 9.0)$ ,  $b(90)$ ,  $D_1$ ,  $p$ )は予測誤差を持つ。各パラメータの予測誤差が余震ハザード結果に与える影響を評価するため感度解析を行う。評価サイトは石巻、評価期間は本震発生から90日間と仮定する。式(2.7)~(2.13)で提案したパラメータを用いて、評価対象以外のパラメータは平均値とし、各評価対象パラメータの平均値と平均値±標準偏差( $\sigma$ )の余震ハザードを計算し、図3.4に示す。なお、石巻での本震によるPGVの観測値は56cm/sであった。

まず、総余震数 $\log_{10}N(90, 4.0, 9.0)$ の場合、 $N$ が大きいほど余震ハザードは大きくなり、予測誤差による結果への影響も大きかった。これは余震ハザード算定式である(2.1)式の $N(T_1, M_{\min}, M_m)$ が大きくなる効果によるものと考えられる。90日間のGR式の傾き $b(90)$ 値の場合、 $b(90)$ が小さいほど規模の大きい余震の割合が多くなり、つまり $N$ は変わらず規模の大きい余震の割合が大きくなることで、余震ハザードは大きくなり、地震間誤差の結果への影響も大きかった。本震マグニチュードと最大余震の差 $D_1$ は(2.4)式の $b$ 値モデルの最大 $M$ と関係があり、 $D_1$ が小さいほど(2.5)式より最大余震 $M_{\max}$ が大きくなる。解析結果によると、 $D_1$ が小さいほど余震ハザードは大きくなることが分かり、 $D_1$ は最大余震に影響するため、その影響はPGVが比較的小さい範囲ではあまり見られないが、PGVが比較的に大きい範囲においてはその影響が顕著であった。一方、本震からの経過時間 $T_1$ が90[日]において時間経過による減衰程度を表す $p$ 値に関しては、小さいほど、つまり減衰しにくい程、(2.3)式により $N$ 値が大きくなり余震ハザードが大きくなる傾向はみられるが、結果への影響は他のパラメータと比べて小さかった。この結果より、 $N$ は大きいほど、 $b(90)$ 、 $D_1$ 、 $p$ は小さいほど余震ハザードが大きくなる効果が見られ、各パラメータの地震間誤差が余震ハザード結果に与える影響の程度を確認した。

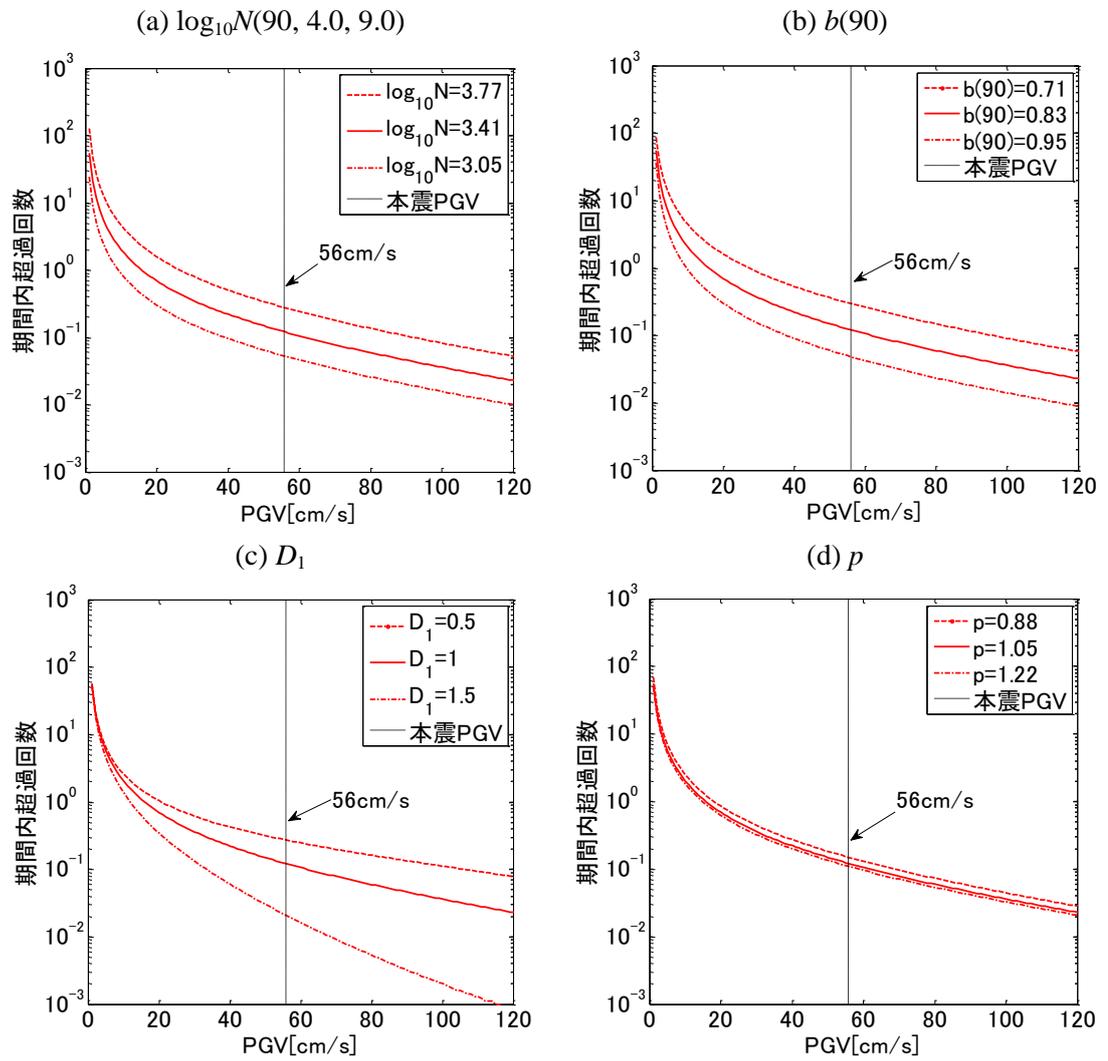


図 3.4 石巻におけるパラメータの感度解析 (90 日間)

### 3.3.3 提案モデルの地震間誤差の評価手法

余震ハザードの入力変数と出力変数の関係が(3.1)式で記述されているため、本研究では級数展開法を用いて地震間誤差による余震ハザードのばらつきを評価する。一般的に出力変数  $Y$  が入力変数  $(X_1, \dots, X_n)$  の関係で表されているとすると、

$$Y = g(X_1, \dots, X_n) \quad (3.6)$$

入力変数の確率密度の高い点(平均値)で上式を Taylor 展開すると、

$$Y \approx g(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_n) + \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i) \frac{\partial g}{\partial X_i} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \bar{X}_i)(X_j - \bar{X}_j) \frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} + \dots \quad (3.7)$$

ただし、 $\bar{X}_i$  は  $X_i$  の平均値とし、偏導関数は全て変数の平均値における値をとる。

級数を一次の項で打ち切り、

$$Y \approx g(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_n) + \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i) \frac{\partial g}{\partial X_i} \quad (3.8)$$

とすると、 $Y$  の一次近似の平均値と分散が次式で得られる。

$$E(Y) \approx g(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_n) \quad (3.9)$$

$$\text{Var}(Y) \approx \sum_{i=1}^n \text{Var}(X_i) \left( \frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 \quad (3.10)$$

ただし、全ての入力変数は互いに独立である。

ここで、(3.10)式の偏微分項は次のように表すことができ、

$$\frac{\partial g}{\partial X_i} = \frac{g(\bar{X}_1, \bar{X}_i + \sigma_{X_i}, \dots, \bar{X}_n) - g(\bar{X}_1, \bar{X}_i, \dots, \bar{X}_n)}{\sigma_{X_i}} \quad (3.11)$$

(3.11)式を(3.10)に代入すると、余震ハザードの分散(標準偏差)は次式のようにになる。

$$Var(Y) = \sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left[ g(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_i + \sigma_{X_i}, \dots, \bar{X}_n) - g(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_n) \right]^2 \quad (3.12)$$

事例として本震からの経過時間  $T_1=90$  日、余震の下限値  $M_{\min}=4.0$ 、本震マグニチュード  $M_m=9.0$  の場合の各パラメータの平均値及び標準偏差を表 3.2 に示す。ここで、 $N(T_1, M_{\min}, M_m)$ については常用対数での標準偏差を用いることに注意する。(3.12)式に(3.1)式を適用し、表 3.2 の値を用いると余震ハザードの標準偏差が計算出来、各パラメータの平均によって計算された余震ハザードからこの標準偏差を足した結果を平均 $+\sigma$ 、引いた結果を平均 $-\sigma$ とする。

表 3.2 余震評価における各パラメータ

( $T_1=90, M_{\min}=4.0, M_m=9.0$  の場合)

パラメータ	平均	標準偏差
$\log_{10}N(90, 4.0, 9.0)$	3.41	0.36
$b(90)$	0.83	0.12
$D_1$	1.0	0.5
$p$	1.05	0.17

### 3.3.4 余震ハザードと観測値との比較

提案モデルによる余震ハザード計算結果と実際の観測値との比較のため、観測サイト毎の90日間の余震ハザードを評価する。各パラメータの平均値を用いた余震ハザード評価結果に加えて、3.3.3節の手法によってパラメータの地震間誤差を考慮した余震ハザード評価を行う。

各サイトにおける余震ハザード結果と実際観測された余震のPGV観測値を図3.5に示す。また本震によって観測されたPGV記録を合わせて示す。

まず石巻の場合、余震PGV観測値は平均パラメータによる余震ハザード結果とほぼ一致することが分かる。本震によるPGVの観測値は56cm/sで、90日間に56cm/sを超える規模の余震数は、平均値による余震ハザード結果で約0.1回、平均値+標準偏差で約0.5回、平均値-標準偏差で0.03回と予測される。

その他のサイトにおける余震ハザード結果と観測値を確認すると、全体的には平均パラメータによる余震ハザード結果と観測値がある程度一致することが確認できるが、PGVが大きくなるほど、余震ハザード結果と観測値の間にずれが見られる。このずれの原因としては、まず確率論的余震発生モデルに含まれている地震間誤差が考えられる。そして、余震ハザード計算では余震が拡大断層面内で様に発生すると仮定しているが、実際には図2.12から分かるようにM7以上の比較的大きな余震5回中の4回がサイトから近い陸側で発生したことも原因の一つと考えられる。また、平面的な分布のみならず、深さ方向の分布にもばらつきが存在するが、ここでは拡大断層面上で発生すると仮定しているため、拡大断層面より浅い規模の大きい余震の観測値は余震ハザード結果より大きくなると考えられる。次に、本研究では全ての余震の地震タイプがプレート間地震と仮定しているが、実際にはプレート内地震や地殻内地震が含まれていることが考えられる。地震タイプの違いによって、距離減衰式の地震タイプ別係数が変わることもずれの原因と考えられる。本研究では、これらの余震ハザードと観測値のずれの対策として、余震発生モデルパラメータに含まれている地震間誤差だけを考慮しているが、その他のずれの原因については今後の課題としたい。

また図3.5によると、本震PGVの観測値は広野、銚田、築館においてそれぞれ62、69、110 cm/sであり、90日間に本震PGVを超える余震数はそれぞれ平均+ $\sigma$ で0.4、

0.4、0.07 回程度と予測された。このように各評価サイトにおける本震 PGV と余震ハザード結果を比較することで、本震 PGV を超える余震数に対して評価することが出来、この手法によって復旧活動計画のための余震ハザードマップに活用することが考えられる。

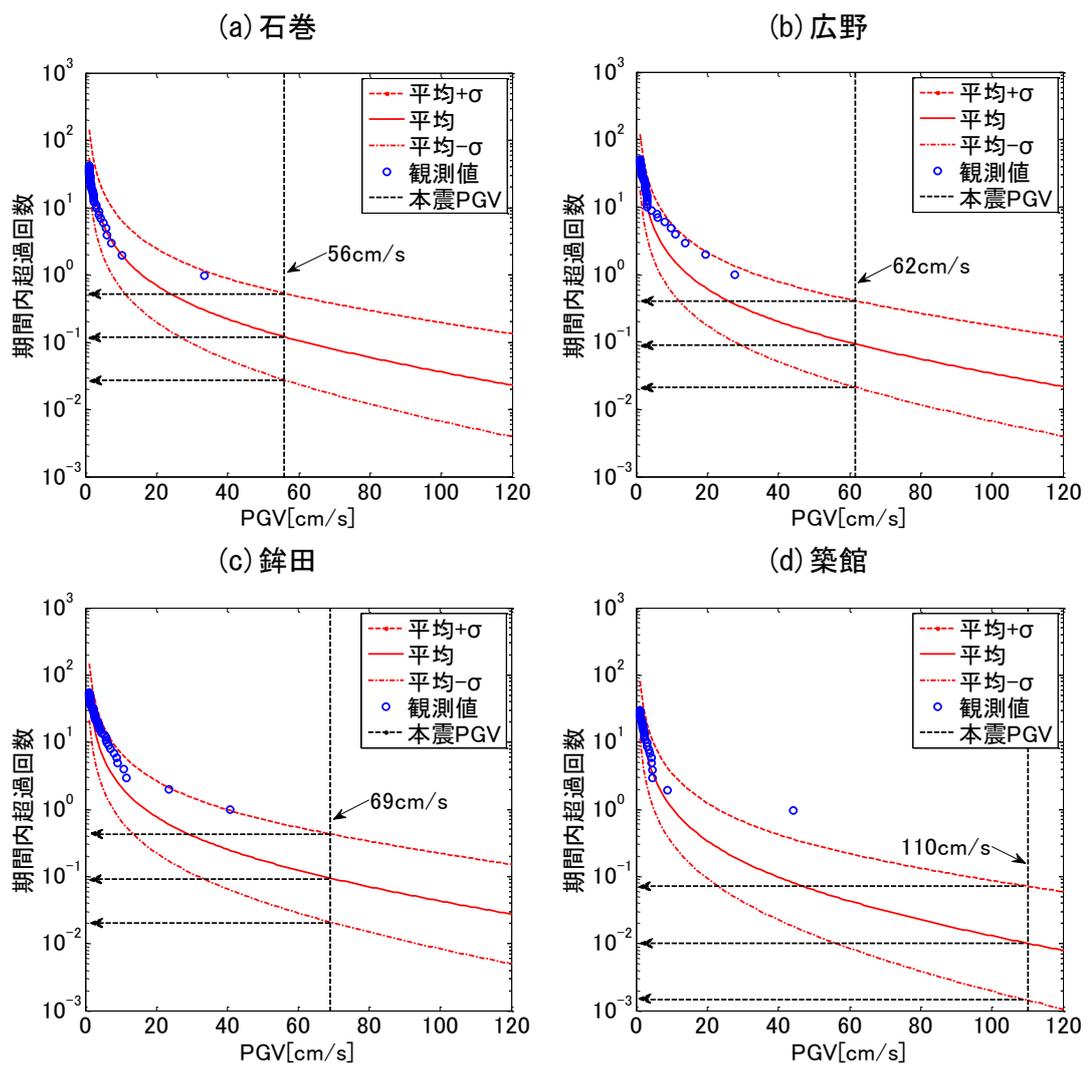


図 3.5 サイト毎の余震ハザードと観測値の比較 (90 日間)

### 3.3.5 本震発生からの時間経過による余震ハザード

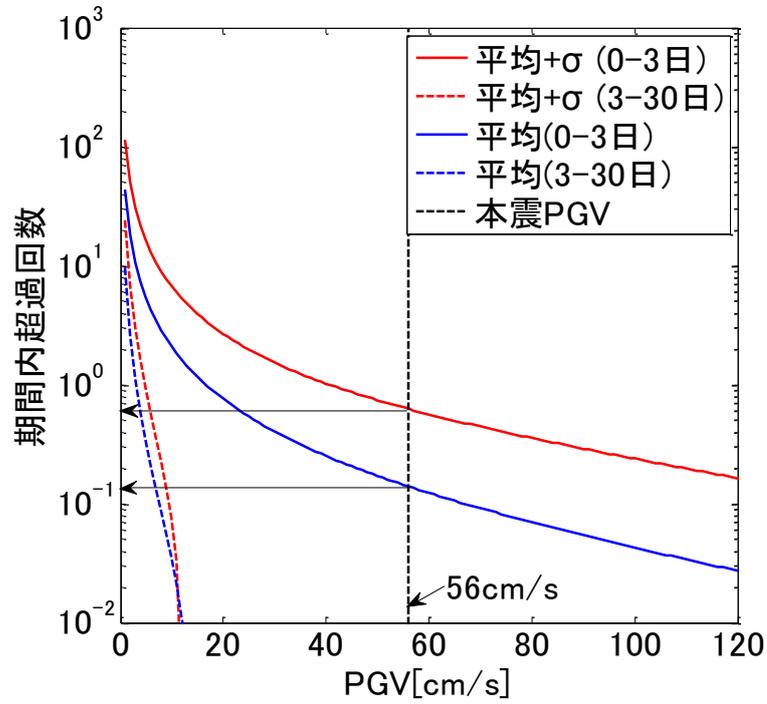
東北地方太平洋沖地震のように巨大本震で大きな被害を受けた後、引き続いて余震が発生する場合、本震によって被害を受けた建物の被害増大、救助活動や復旧活動中に二次被害を受ける可能性がある。そこで、海溝型巨大地震直後に余震活動を予測して復旧活動計画を策定するため、本震発生からの時間経過による余震ハザードの評価が必要と考えられる。

中央防災会議<sup>9)</sup>の地震防災段階によると、本震発生当日中の対応を初動対応、本震発生後1日から3日までを応急対応、本震発生後3日から1週間までを応急~復旧対応、1週間から1カ月までを復旧対応、1カ月以降を復興と定義している。これを参考にして本研究の評価期間として、初動対応と応急対応を合わせた本震発生から3日間を応急活動期と、本震発生後3日から30日までの期間を復旧活動期と設定する。また、評価サイトは石巻と仮定する。提案モデルの平均値と平均値+標準偏差を用いて計算した評価期間による余震ハザード結果を図3.6に示す。ここで、本震発生から3日-30日間の復旧活動期の余震ハザードは式(3.13)のように表され、式(3.1)によって求めた本震発生から30日間の余震ハザードから本震発生から3日間の余震ハザードを引き算することで求められる。

$$\begin{aligned} & N(Y_{surf} > y | 3 \leq t < 30, M_m) \\ & = N(Y_{surf} > y | 30, M_m) - N(Y_{surf} > y | 3, M_m) \end{aligned} \quad (3.13)$$

平均パラメータによる結果より、期間内で本震によるPGVである56cm/sを超える余震数は、0-3日間で0.1回、3-30日間ではほぼ0であった。また期間内に1回以上発生すると予測される余震のPGVは、0-3日間で約17cm/sであるのに対し、3-30日間では約3cm/sであり、復旧活動期の結果が応急活動期の結果より十分小さいことが分かる。平均+ $\sigma$ においても同様な結果となり、復旧活動期の余震ハザードは応急活動期の余震ハザードに比べ十分小さいが確認できた。

(a) 本震 PGV との比較



(b) 期間内超過回数=1 との比較

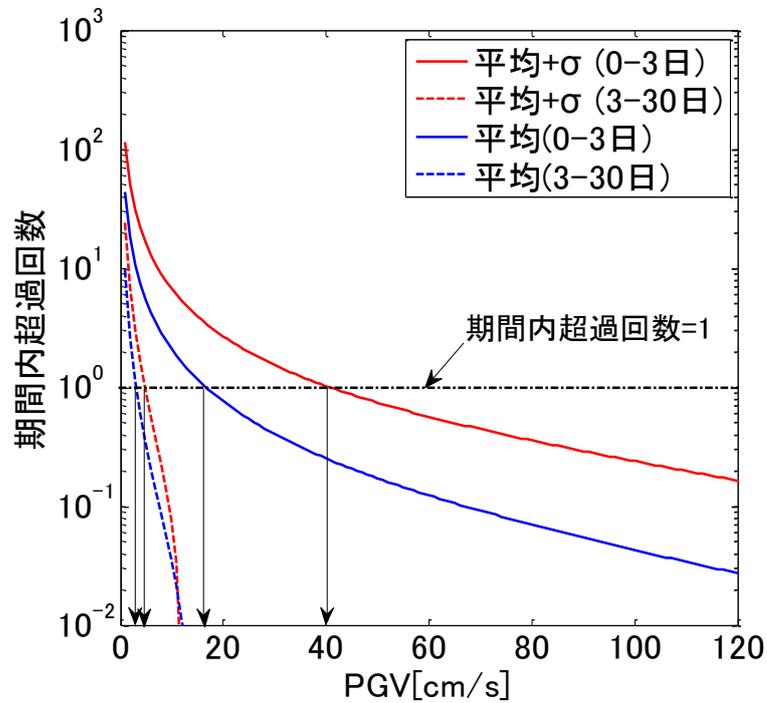


図 3.6 本震から時間経過による余震ハザード比較 (@石巻, 東北地方太平洋沖地震)

### 3.4 適用事例

3.3 節では提案モデルに対して、そのパラメータの感度解析と余震ハザード計算結果を東北地方太平洋沖地震の観測値と比較することで適用性を確認した。3.4 節では適用事例として、将来 1923 年関東地震及び 1854 年安政東海東南海地震と同規模の地震が発生したと仮定して、その後の余震ハザード評価を行う。ただし、本研究で提案した確率論的余震発生モデルのパラメータは三陸沖、宮城県沖、十勝沖の海溝型地震の余震分析から求めたものであるが、関東地震及び安政東海東南海地震は地域が異なるため、地域差による余震発生の違いがあるかもしれないが、本研究では関東地震及び安政東海東南海地震の余震においても同様な傾向があると仮定して分析を行った。今後はこの地域差による違いについても研究する必要があると考える。

#### 3.4.1 1923 年関東地震への適用

1923 年 9 月 1 日に神奈川県西部を震源として発生した本震マグニチュード 7.9 の関東地震が発生した。関東地震は相模トラフを震源とする海溝型地震であり、人口密度の高い首都圏から断層面までの距離が近いため、陸から離れて発生する海溝型地震と比べて、本震の地震動のみならず余震による地震動も大きくなると予測され、余震に対する十分な注意が必要である。3.4.1 節では、将来 1923 年関東地震と同規模の地震が発生したと仮定し、その断層面と本震マグニチュードを利用して、余震ハザード評価を行う。

解析条件として、本震マグニチュードは  $M_m=7.9$  とし、余震域は Kobayashi & Koketsu<sup>[5]</sup>の断層面を中心に、本震マグニチュードから式(2.7)によって求めた余震域の面積になるように広げた拡大断層面を使用する。観測サイトは K-NET の鎌倉 (KNG005 (緯度=35.32、経度=139.55)、AVS30 = 443 m/s)と設定する。図 3.7 に余震域と観測サイトを示す。図 3.7 の点線が本震による断層面、実線が本震マグニチュードから余震域面積を計算して広げた拡大断層面である。余震発生はこの拡大断層面を約 10km に分割したメッシュ上で一様に発生すると仮定する。

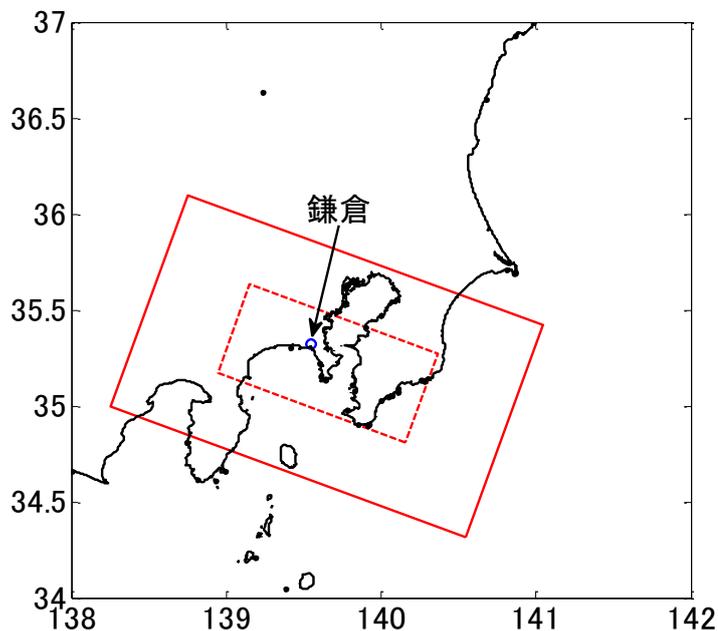


図 3.7 1923 年関東地震の余震域と観測サイト

本震発生から 3 日及び 30 日間の鎌倉における余震ハザード結果を図 3.8 に示す。予測誤差を考慮するためパラメータとして平均値及び平均値+ $\sigma$  を使用する。気象庁によるとライフラインやインフラ等への影響が出始めるのは震度 5 弱(計測震度 4.8)程度とされており<sup>6)</sup>、計測震度 4.8 を藤本・翠川<sup>7)</sup>によって中央値で計算すると、その PGV は 15cm/s に相当する。解析結果から、鎌倉において本震発生から 3 日間の応急活動期において 15cm/s を超える余震数はパラメータの平均及び平均+ $\sigma$  で、それぞれ 0.8 回、2 回であった。また司・翠川の距離減衰式によって計算した本震の PGV の中央値は 58cm/s であり、鎌倉において本震から 3 日間に本震 PGV を超える余震数は平均、平均+ $\sigma$  において 0.05 回、0.2 回であった。次に 3-30 日間の復旧活動期において 15cm/s を超える余震数は、平均及び平均+ $\sigma$  でそれぞれ 0.1 回、0.4 回であった。また復旧活動期において本震による PGV である 58cm/s を超える余震回数は平均及び平均+ $\sigma$  でそれぞれ約 0.006、0.02 回であり、復旧活動期の余震ハザードは応急活動期より十分小さかった。また 3-30 日の復旧活動期における余震ハザードは 0-30 日の応急活動期の結果と比べハザード曲線の傾きが大きい特徴があり、 $b$  値を時間関数にした影響であると考えられる。

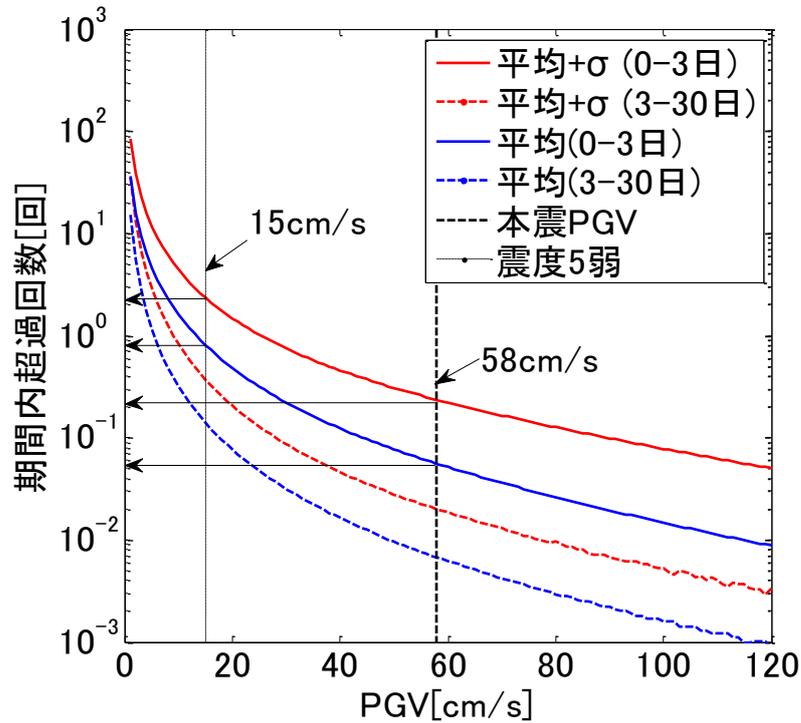


図 3.8 本震から時間経過による余震ハザード比較 (@鎌倉、1923 年関東地震)

### 3.4.2 東海・東南海連動型地震への適用

南海トラフのプレート境界では歴史的に見て、概ね 100～150 年の間隔で東海地震、東南海地震、南海地震の海溝型巨大地震が発生している。これらの地震は数時間から数年の期間をおいて発生していて、3 つの地震が連動して発生する可能性もある。本節では南海トラフ沿いで発生する巨大地震後の復旧活動計画のため、余震ハザード評価を行う。

3.4.2 節では、提案モデルを 1854 年安政東海東南海地震に適用して、将来に同規模の東海東南海連動型地震が発生したと仮定した時の余震ハザード評価を行う。解析条件として、本震マグニチュードは  $M_m=8.4$ 、余震域は Ando<sup>[8]</sup>の東海地震の断層面を参考に、本震マグニチュードによる拡大断層面の面積になるよう広げた拡大断層面と仮定する。観測サイトは K-NET の浜松(SZO024(緯度=34.71、経度=137.72)、AVS30 = 404 m/s)と仮定する。図 3.8 に余震域と観測サイトを示す。図 3.9 の点線が安政東海東南海地震の本震断層面、実線が本震規模を考慮して広げた拡大断層面である。

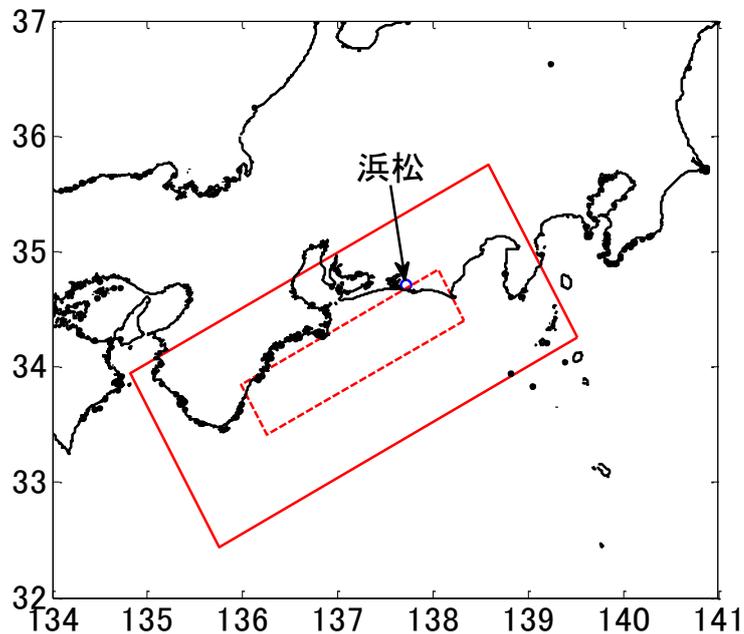


図 3.9 1854 年安政東海東南海地震の余震域と観測サイト

本震から 3 日及び 30 日間の浜松における余震ハザードを図 3.10 に示す。予測誤差を考慮するため、パラメータとして平均値と平均値+ $\sigma$  を使用する。本震発生から 3 日間に 15cm/s を超える余震は平均、平均+ $\sigma$  において、それぞれ 1.2 回、4 回であり、3.4.1 節の鎌倉における関東地震の余震ハザード結果である、0.8 回、2 回に比べ、大きな結果となった。なお、本震 PGV は 3.4.1 節と同様に司・翠川の距離減衰式を用いて中央値で計算した結果 72cm/s となり、3 日間にこれを超える余震数は平均及び平均+ $\sigma$  でそれぞれ 0.08 回、0.3 回である。5.4.1 節の関東地震の結果と比べると  $M_m$  が大きくなったため本震 PGV は大きくなったが、本震規模の地震動を超える余震の発生回数は両者であまり変わらなかった。次に、浜松における応急活動期及び復旧活動期の余震ハザードを比較すると、本震規模の PGV を超える余震回数は応急活動期と復旧活動期の平均+ $\sigma$  でそれぞれ約 0.3 回、0.01 回以下であった。このように本震の PGV を超えるような余震ハザードの定量評価により、応急活動期及び復旧活動期における意思決定をするための判断材料として活用することが出来ると考える。

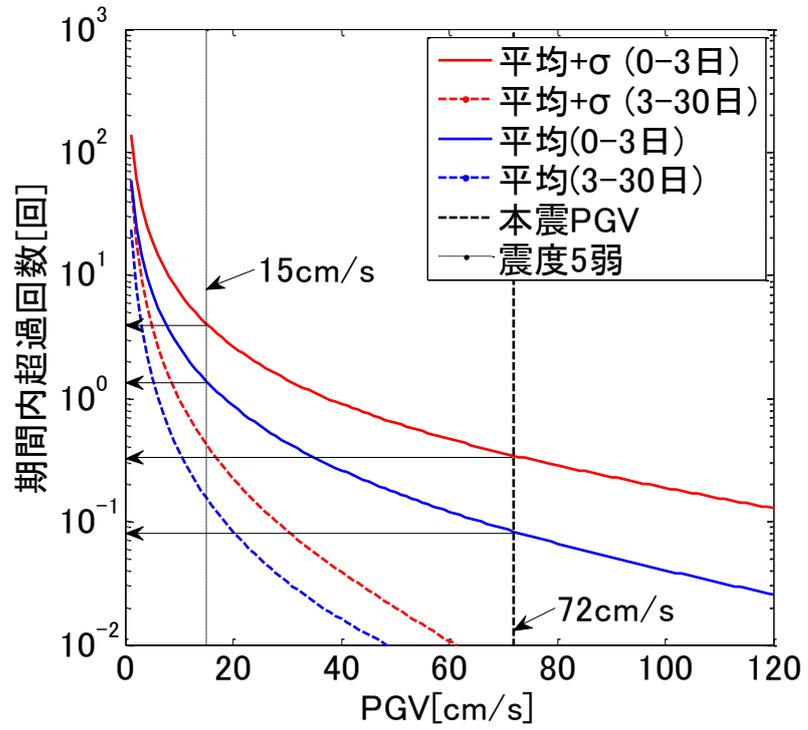


図 3.10 本震から時間経過による余震ハザード比較 (@浜松, 東海東南海地震)

### 3.5 まとめ

本章では、2章で提案した確率論的余震発生モデルを用いて、余震ハザード評価を行った。3.2では、既往の地震ハザード評価式に2章の確率論的余震発生モデルを適用した確率論的余震ハザード評価手法を提案した。

3.3では、東北地方太平洋沖地震に確率論的余震ハザード評価を適用して、提案モデルの適用性を確認した。その結果として、以下のことが明らかになった。

- ・パラメータ  $\log_{10}N(90, 4.0, 9.0)$ 、 $b(90)$ 、 $D_1$  による影響は比較的大きかったのに対し、パラメータ  $p$  の影響は小さかった。特に  $D_1$  に関しては比較的 PGV が大きい区間においてその影響が大きいことが確認できた。
- ・提案手法による余震ハザード結果は実測値とある程度一致することを示した。ただし、平均パラメータによる余震ハザード結果からのずれも確認された。その原因として、パラメータの地震間誤差、余震発生空間的ばらつき、地震タイプなどが考えられる。本研究では、まず、パラメータの地震間誤差を考慮して評価を行った。その他のずれの対策については、今後の課題とする。

3.4では、将来の海溝型巨大地震が発生する際の余震発生を予測する目的で、1923年関東地震と1854年安政地震が将来発生したと仮定しその余震ハザードを評価し、以下の知見を得た。

- ・0-3日間の応急活動期と3-30日間の復旧活動期における余震ハザード評価により、応急活動期には本震規模を超える PGV を持つ余震に対する対策が必要であることが分かった。一方、復旧活動期では応急活動期より小さい余震ハザードとなった。
- ・本震の PGV を超えるような余震ハザードの定量評価により、応急活動期及び復旧活動期における意思決定をするための判断材料として活用することが出来る。

### 3 章の参考文献

- [1] 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図、  
[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_yosokuchizu/](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/), (2011/08/31 閲覧).
- [2] 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, No.523, pp.63-70, 1999.9.
- [3] 宇津徳治：地震学(第3版), 共立出版株式会社, 2007.
- [4] 気象庁地震火山部:緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料, 2008, [http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats\\_EEW/reference.pdf](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats_EEW/reference.pdf), (2013/02/21 閲覧).
- [5] Kobayashi, R., and K. Koketsu : Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data. /Earth Planets and Space/ 57 (4), pp.261-270, 2005.3.
- [6] 気象庁：気象庁震動階級の解説、平成 21 年 3 月.
- [7] 藤本一雄・翠川三郎：兵庫県南部地震以降の近年の強震記録に基づく計測震度と地震動強さ指標の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.93-94, 2005.9.
- [8] Ando, M. : Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the nankai trough, Japan, Tectonophysics 27 (2), pp.119-140, 1975.6.
- [9] 中央防災会議：地方都市等における地震防災のあり方に関する専門調査会報告, <http://www.bousai.go.jp/jishin/chihou/bousai/pdf/checklist.pdf>, 平成 24 年 3 月, (2014/01/31 閲覧).

## 第4章

# 余震ハザードマップの提案と応用例

### 4.1 はじめに

海溝型巨大地震の後に発生する規模の大きい余震は復旧活動に大きな影響を与える。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震から約一カ月後の2011年4月7日のM7.2の余震と2011年4月11日のM7.1の余震の影響で、ガス、水道、電気供給が東北の広い領域において停止された。この強い余震によって、鉄道施設や高速道路などが被害を受け、運転見合わせや通行止めとなった。なお本震直後の救助活動中やライフライン復旧活動中に大きな余震が発生すると二次被害の恐れもある。本震によって建物に大きな被害を受けた住民は引き続いて発生する余震によって二次被害を受ける可能性があるため、避難生活を余儀なくなれる。このように、巨大地震後の被災地では引き続いて発生する余震のため、救助活動、ライフライン復旧活動、避難計画などにおいて優先順位や実行期間設定などの様々な意思決定を行わないといけない。このような復旧活動計画を策定するためには、巨大地震後の余震の様子を合理的に予測する枠組みが必要である。

4章では、2章と3章で提案した余震発生モデルと余震ハザード評価手法を用いて、復旧活動計画に活用するための余震ハザードマップを提案する。4.2節では適用事例として、関東地震が発生したと仮定し、首都圏におけるハザードマップの作成手法について説明する。4.3節では本震発生からの経過時間( $T_1$ )の効果を評価するため、関東地震を対象に本震発生からの経過時間( $T_1$ )を数時間から10日間まで変えながら余震ハザード評価を行い、求められた余震ハザードマップを分析する。4.4節では提案した余震ハザードマップの活用法に関する考察を行い、応用例について述べる。

## 4.2 余震ハザードマップの提案

### 4.2.1 解析条件

将来首都圏で発生する巨大地震の余震について評価するため、1923年と1703年の関東地震をモデル化し、提案した確率論的余震発生モデルと余震ハザード手法によって、本震後の余震の様子について予測する。

図 4.1 に余震域と評価サイトについて示す。1923年関東地震の本震マグニチュードは M7.9、余震域は Kobayashi & Koketsu<sup>[1]</sup>の本震断層面を参考にし、本震マグニチュードによって本震断層面を中心に広げた拡大断層面とする。この拡大断層面の南西側の深さが浅く、北東方向行くほど深さが深くなる。また1703年関東地震の本震マグニチュードは M8.2、余震域は Matsuda et al.(1978)<sup>[2]</sup>を中心に本震マグニチュードを考慮して広げた拡大断層面とする。この拡大断層面も南西側の深さが浅く、北東方向行くほど深さが深くなる。1923年関東地震の余震域と比べると、図 4.1 に示されているように、1923年関東地震の余震域より全体的に東側にずれており、本震マグニチュードが 0.3 大きいため、余震域の面積も大きく仮定されている。評価サイトは東京都、埼玉県、千葉県、神奈川県、静岡県、山梨県、茨城県にある 113 ヶ所の K-NET 所在地とし、図 4.1 の丸(○)で示す。

評価期間は、本震発生直後から 3 日までを応急活動期と、本震発生から 3 日から 30 日までを復旧活動期と仮定し、それぞれの余震ハザードを評価する。

2章で提案した確率論的余震発生モデルによって計算した  $M_m=7.9$  及び  $8.2$  の  $T_1=3$  日及び 30 日のパラメータの平均値と標準偏差を表 4.1 に示す。確率論的余震発生モデルの提案パラメータで含まれる地震間誤差(ばらつき)の余震ハザード評価への影響は、3.3.3 節の地震間誤差の評価手法によって余震ハザードの標準偏差( $\sigma$ )を計算し、平均と平均+ $\sigma$  によって余震ハザードを評価する。

表 4.1 余震発生モデルのパラメータ ( $M_{\min}=4.0$ )

	$T_1=3$ [日]		$T_1=30$ [日]	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
$\log_{10}N(T_1, 4.0, 7.9)$	2.19	0.36	2.38	0.36
$\log_{10}N(T_1, 4.0, 8.2)$	2.44	0.36	2.64	0.36
$b(T_1)$	0.73	0.12	0.80	0.12
$p$	1.05	0.17	1.05	0.17
$D_1$	1.0	0.5	1.0	0.5

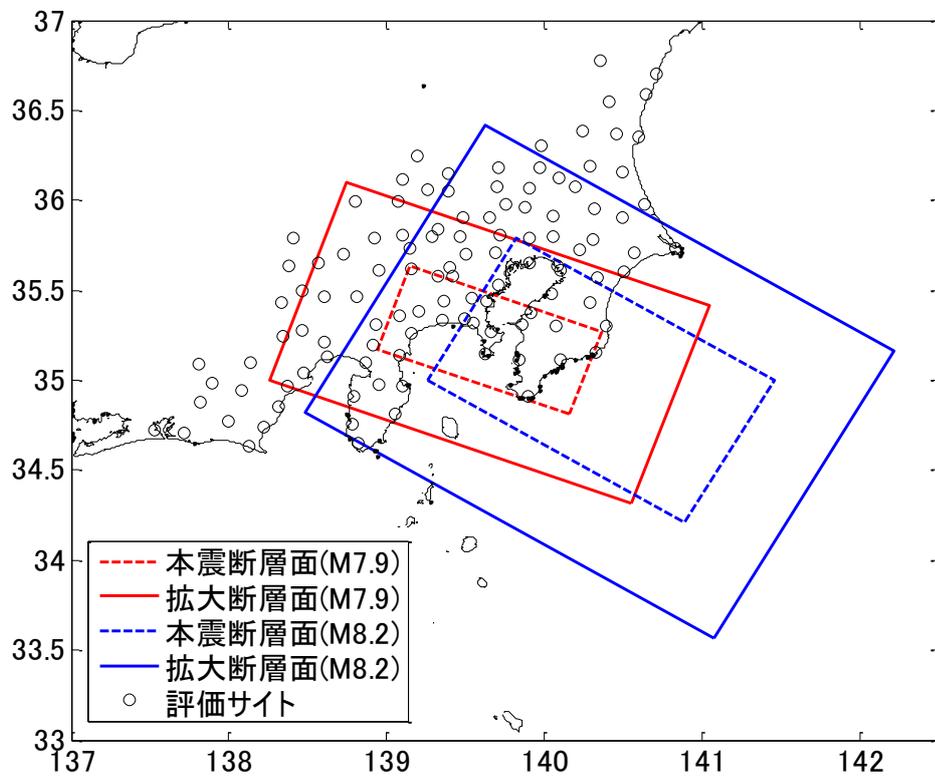


図 4.1 余震域及び評価サイト

#### 4.2.2 鎌倉における余震ハザード結果

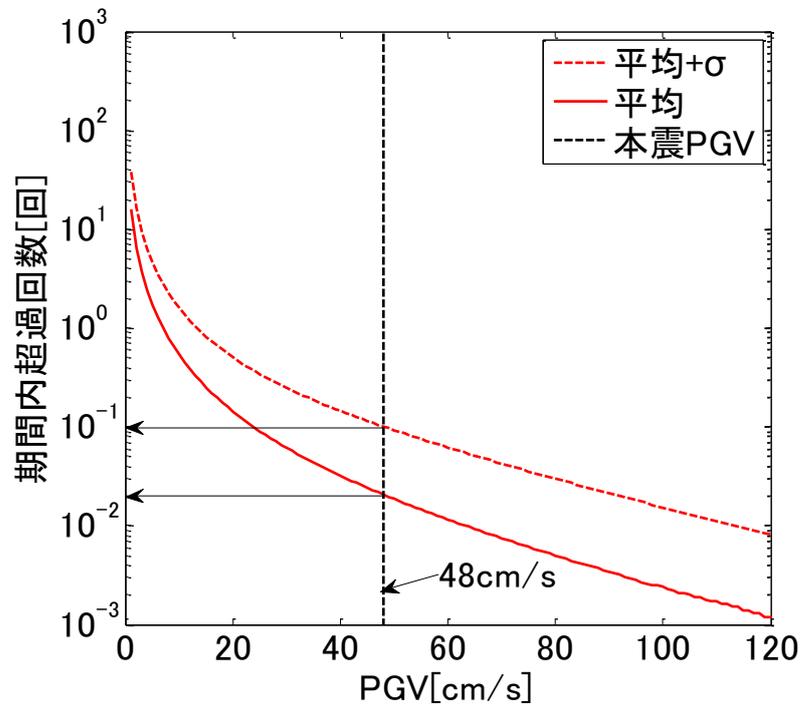
余震ハザード結果の一例として、評価サイトの中で鎌倉を選択し、本震マグニチュード  $M_m=7.9$  及び  $M_m=8.2$  に対する、本震発生から3日までの応急活動期と3日から30日までの復旧活動期の余震ハザード結果を図4.2と図4.3にそれぞれ示す。本研究では、本震によって被害を受けた後に再び本震規模の地震動(PGV)を受けることを想定し、評価サイトにおける本震によるPGVを余震ハザード評価の一つの基準値として用いる。司・翠川の距離減衰式によって中央値で計算した鎌倉における工学的基盤上の予測本震PGVは、 $M_m=7.9$ の場合に48cm/s、 $M_m=8.2$ の場合に56cm/sであった。ただし、3章では本震によるPGV観測値と余震ハザード結果を比較したため、余震ハザード計算に地盤増幅率を考慮したが、ここでは本震PGVも距離減衰式による予測値とするため、本震PGV及び余震ハザード算定時に地盤増幅率を考慮しない工学的基盤面における値とすることに注意が必要である。

本震発生から3日間に本震規模のPGVを超える余震は、 $M_m=7.9$ の場合、平均パラメータで約0.02回、平均 $+\sigma$ で約0.1回発生することが予想される。また $M_m=8.2$ の場合、本震PGVを超える余震数は平均パラメータで約0.04回、平均 $+\sigma$ で約0.14回と予測される。

次に、復旧活動期(本震発生から3-30日間)における本震規模のPGVを超える余震は、 $M_m=7.9$ の場合、平均パラメータで約0.002回、平均 $+\sigma$ で約0.007回発生することが予想される。また $M_m=8.2$ の場合、本震PGVを超える余震数は平均パラメータで約0.003回、平均 $+\sigma$ で約0.007回と予測された。

以上から、応急活動期と復旧活動期に鎌倉における余震ハザード評価を行った。復旧活動期より応急活動期のハザードが大きく、復旧活動期における本震規模のPGVを超える余震発生は十分小さいことが確認できた。

(a)  $M_m=7.9$



(b)  $M_m=8.2$

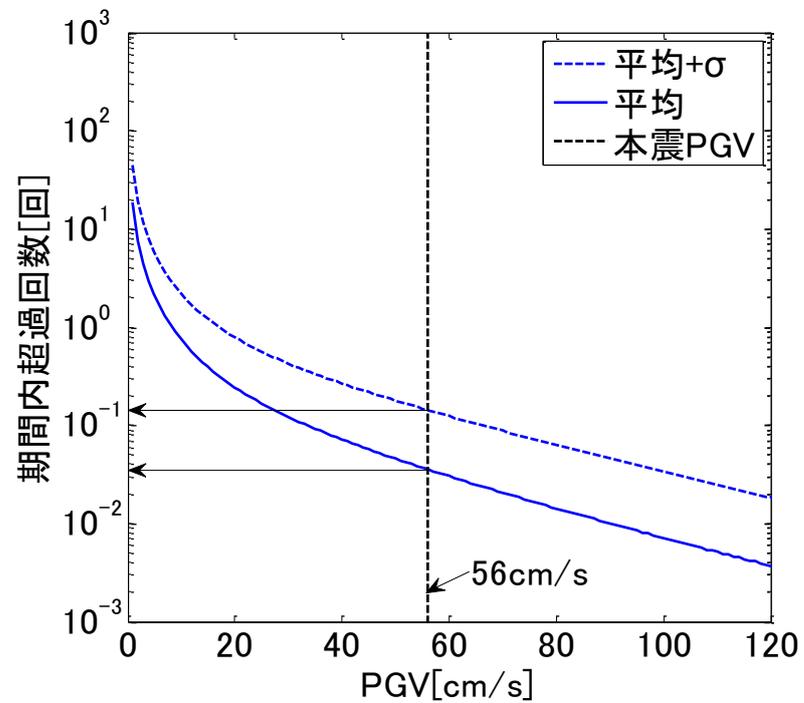
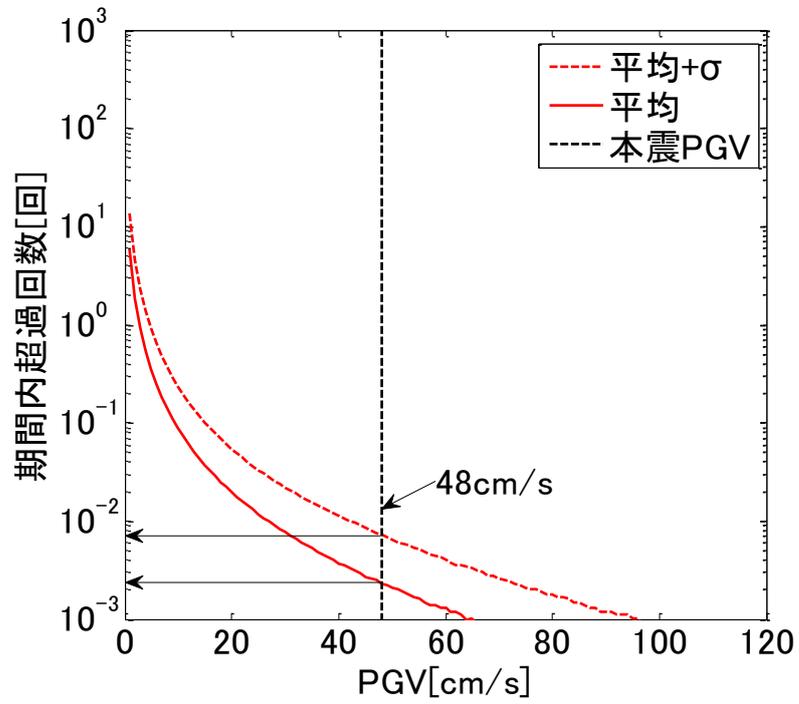


図 4.2 応急活動期(0-3 日間)の余震ハザード結果(@鎌倉)

(a)  $M_m=7.9$



(b)  $M_m=8.2$

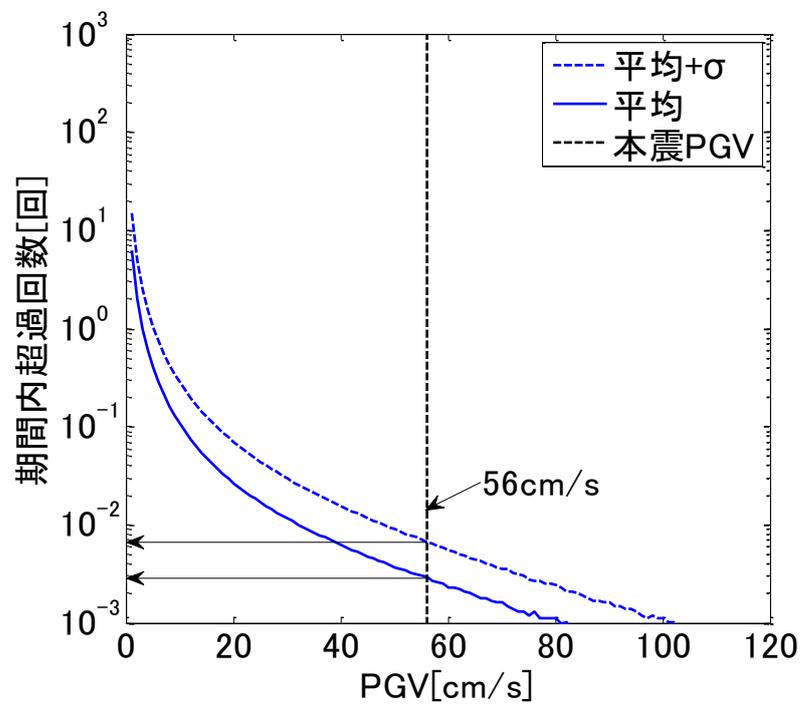


図 4.3 復旧活動期 (3-30 日間) の余震ハザード結果 (@鎌倉)

### 4.2.3 余震ハザードマップ

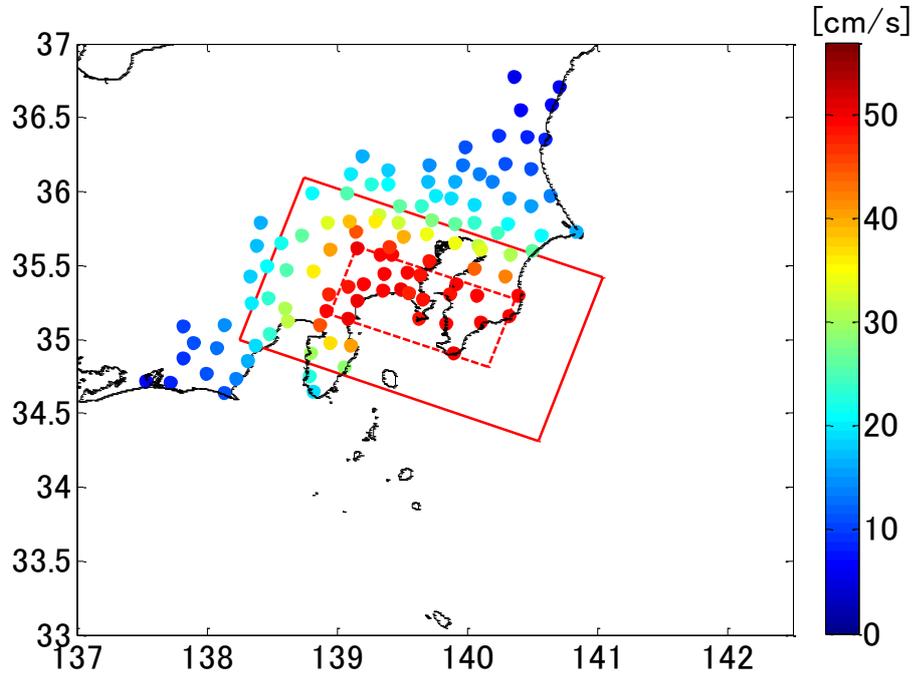
4.2.2 節で行った余震ハザード評価を鎌倉以外の全て評価サイトに対しても行う。まず、各評価サイトにおける本震による PGV の中央値を計算して、図 4.4 に示す。次に、応急活動期及び復旧活動期においてこの本震 PGV を超える余震回数に関する余震ハザードマップを作成し、それぞれ図 4.5、4.6 に示す。本震マグニチュード 7.9 の平均+ $\sigma$  と平均の結果を(a)、(b)に、本震マグニチュード 8.2 の平均+ $\sigma$  と平均の結果を(c)、(d)にそれぞれ示す。

図 4.4 によると、工学的基盤上の本震 PGV の中央値は各評価サイトから本震断層面までの最短距離に近い程大きく、本震断層面までの距離が遠い程小さい。 $M_m=7.9$  の場合、本震断層面の周辺で最大 50cm/s となり、本震断層面から外側に行くことで小さくなった。また、 $M_m=8.2$  の場合も同様に、本震断層面のすぐ上に位置するサイトで最大 57cm/s であり、外側に行くとき小さくなることが分かる。

図 4.5 によると、応急活動期に本震 PGV を超える余震数は、 $M_m=7.9$  の場合、拡大断層面の深さが浅い南西部に近いサイトにおける結果が大きく、平均+ $\sigma$  で最大 0.52 回、平均で 0.20 回発生すると予測される。また  $M_m=8.2$  の場合も、拡大断層面の深さが浅い伊豆半島周辺のサイトで本震 PGV を超える余震数が大きいことが見られ、平均+ $\sigma$  で最大 0.43 回、平均で 0.15 回となった。本震断層面から近い領域では、拡大断層面までの最短距離が近い余震ハザードが大きくなるが、本震 PGV の増大がより著しく、結果的に本震 PGV を超える余震数はあまり多くない。また拡大断層面の深さが深い拡大断層面の北東側に位置するサイトでは、余震ハザード結果と本震 PGV が共に小さく、結果的に本震 PGV を超える余震数も少なかった。一方、拡大断層面の深さが浅い拡大断層面の南西側周辺のサイトでは、拡大断層面からの距離が近い余震ハザードは大きく、本震断層面からある程度離れているため本震 PGV は本震断層面周辺に比べ小さいため、結果的に本震 PGV を超える余震数が大きくなることを確認できる。

次に図 4.6 には本震発生後 3 日から 30 日間の復旧活動期における本震 PGV を超える余震数に関するハザードマップを示す。全体的な傾向は図 4.5 と同様で、 $M_m=7.9$  の場合、平均+ $\sigma$  及び平均で、最大約 0.13 回、0.07 回、 $M_m=8.2$  の場合、0.06 回、0.02 回となり、応急活動期に比べて復旧活動期の本震規模の余震数は十分小さかった。

(a)  $M_m=7.9$



(b)  $M_m=8.2$

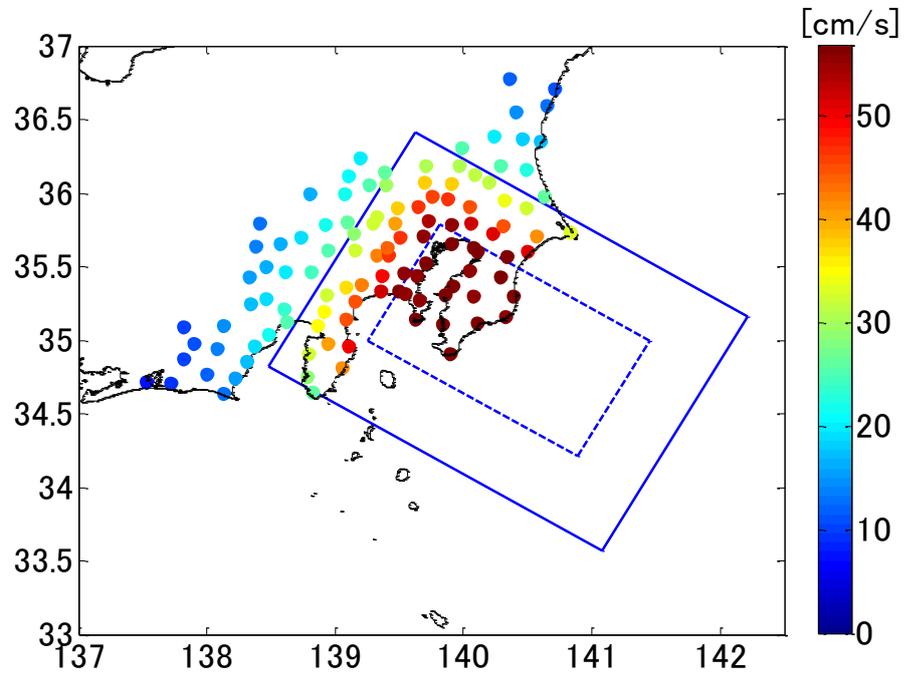
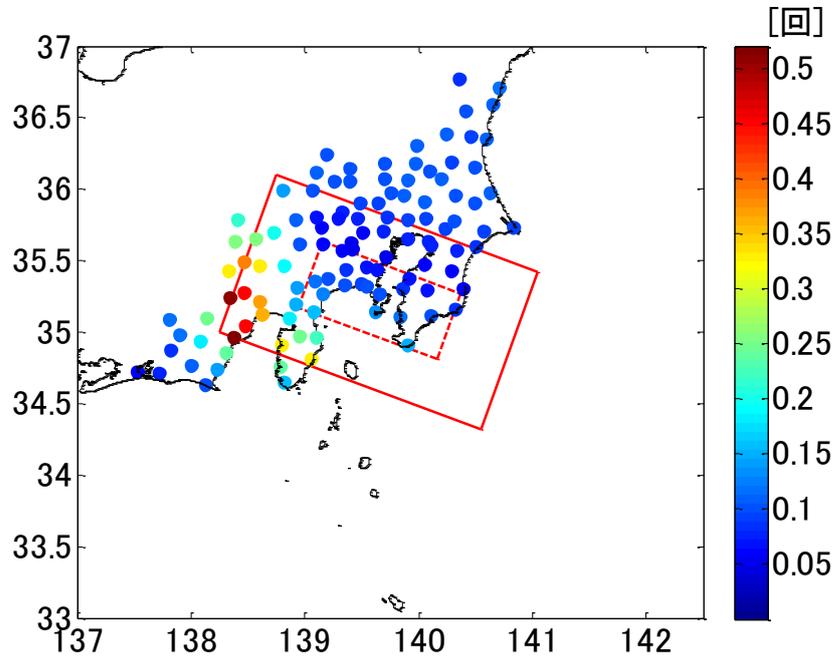
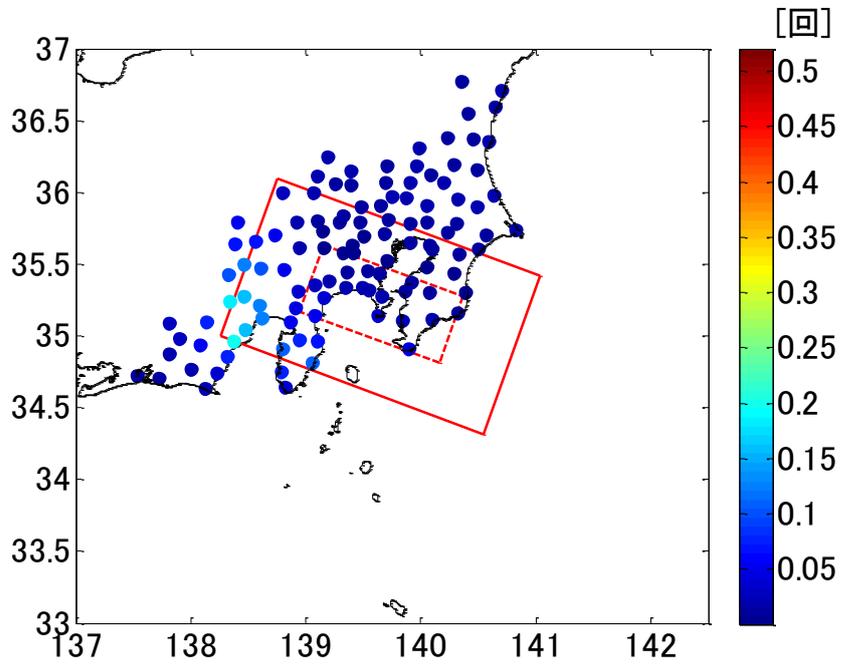


図 4.4 評価サイトにおける工学的基盤上の本震 PGV の中央値

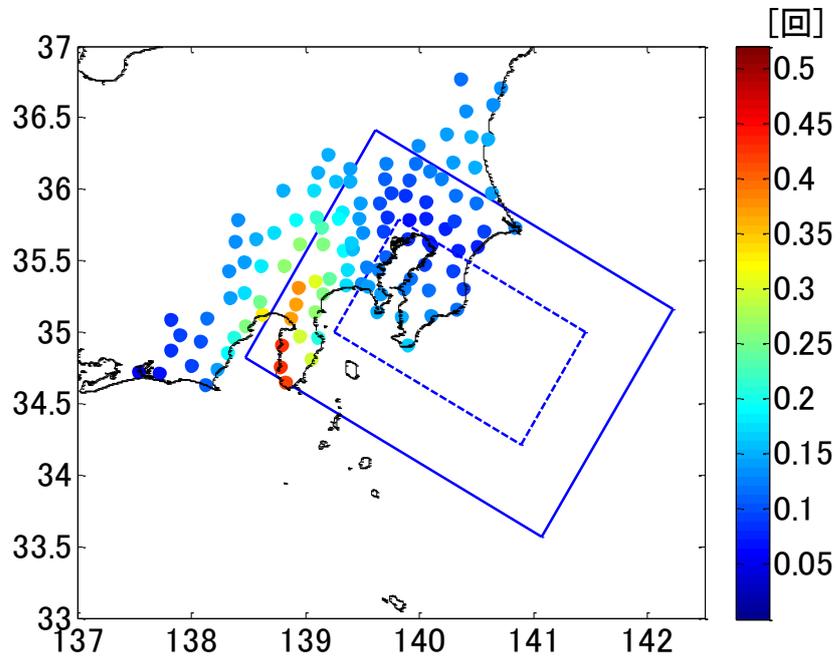
(a)  $M_m=7.9$ , 平均 $+\sigma$



(b)  $M_m=7.9$ , 平均



(c)  $M_m=8.2$ , 平均+ $\sigma$



(d)  $M_m=8.2$ , 平均

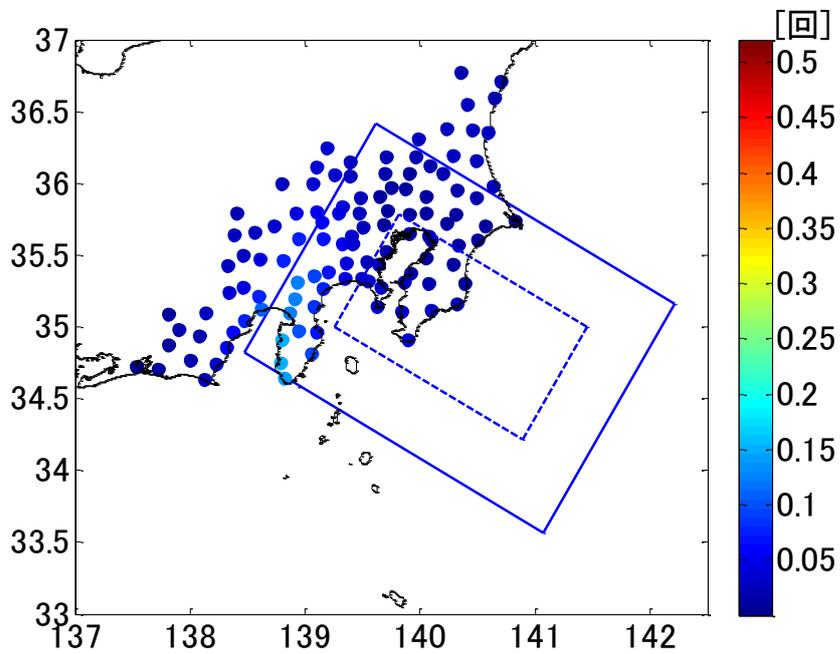
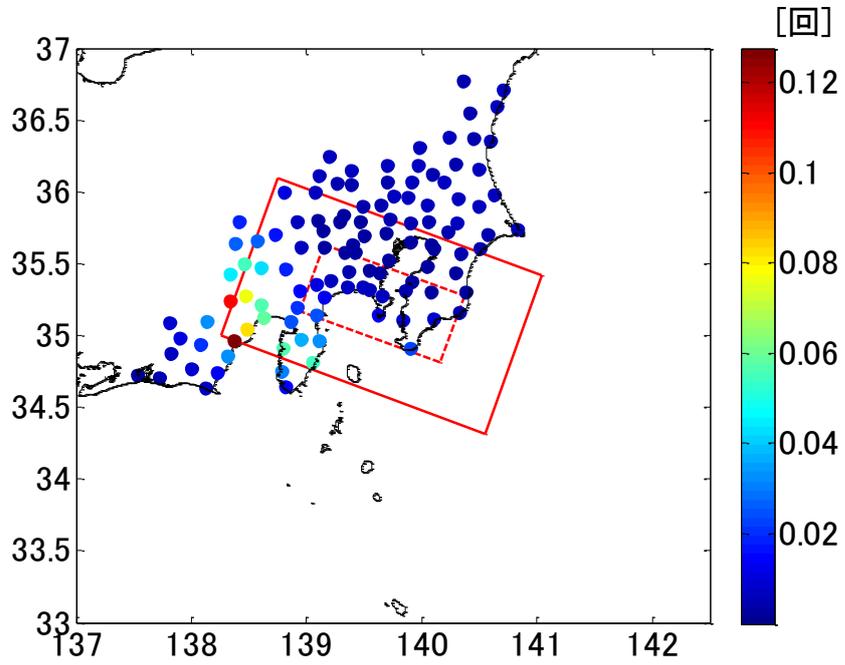
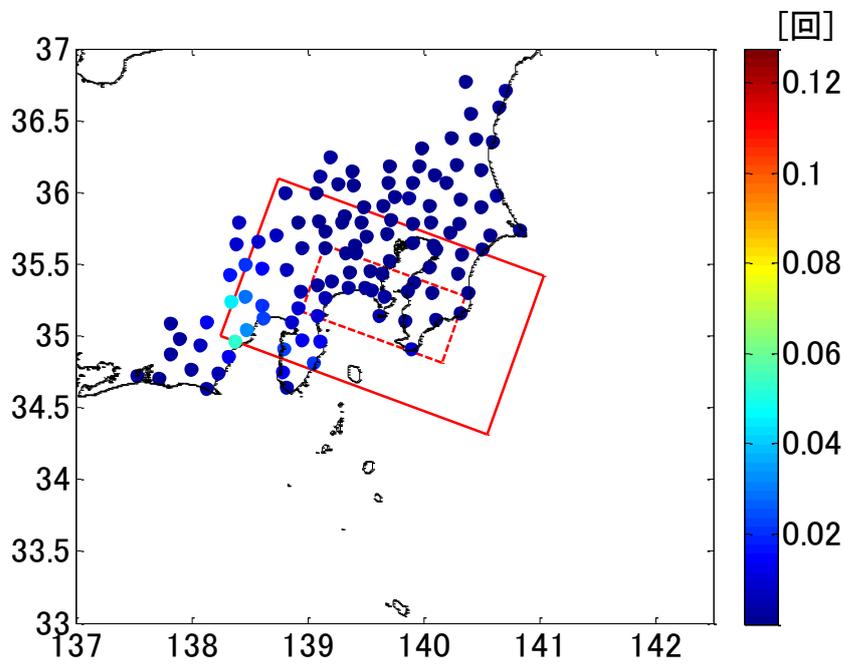


図 4.5 応急活動期の本震 PGV を超える余震数に関する余震ハザードマップ

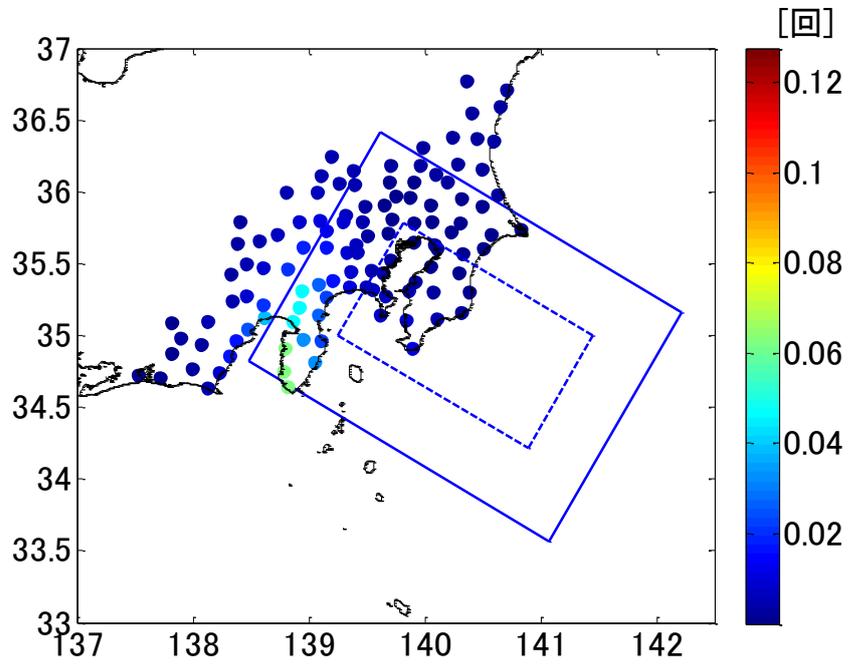
(a)  $M_m=7.9$ , 平均 $+\sigma$



(b)  $M_m=7.9$ , 平均 $+\sigma$



(c)  $M_m=8.2$ , 平均+ $\sigma$



(d)  $M_m=8.2$ , 平均

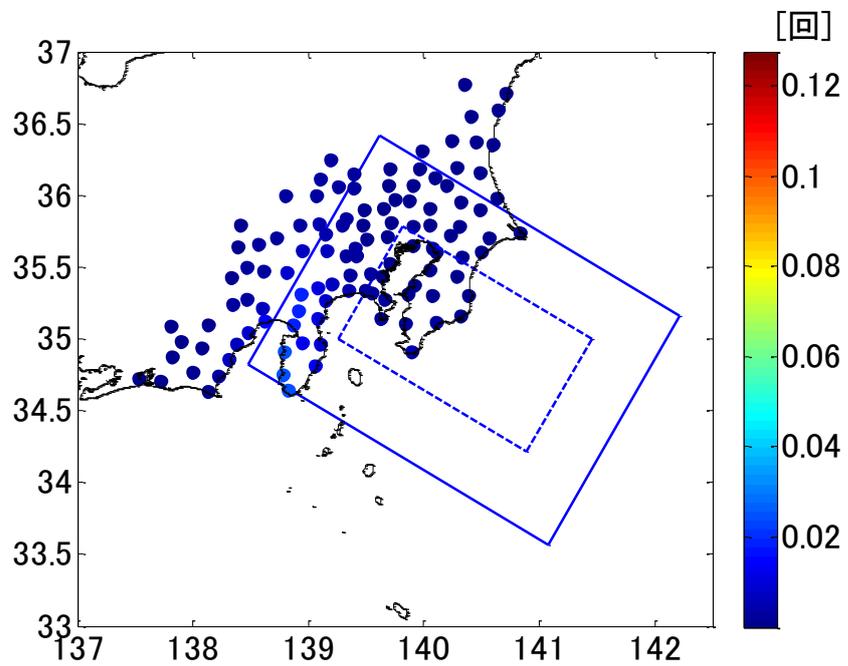


図 4.6 復旧活動期の本震 PGV を超える余震数に関する余震ハザードマップ

### 4.3 本震発生直後における提案手法の適用性評価

前節までは本震発生から3日間の応急活動期と本震発生から3日から30日までの復旧活動期における余震ハザード評価を行い、本震PGVを超える余震発生数に関するハザードマップを提案した。しかし、復旧活動計画により有効に活用するためには、本震発生から数時間単位の余震評価が必要な場合もある。例えば、津波危険地域における余震と津波の同時発生ハザード評価、救助活動や工場稼働中止、鉄道運行の見合わせなどの意思決定の場合には、本震発生から日単位での余震評価では対応が間に合わないため、数分または数時間単位での余震評価が必要である。このように、提案モデルを本震発生から数時間程度の余震ハザード評価が可能となれば、より広い範囲における防災対策まで活用することができると考えられる。

4.3節では4.2節に続いて関東地震を対象に、本震発生から経過時間( $T_1$ )を数時間から10日までの余震ハザード評価を行い、本震発生から時間単位の余震ハザードへの適用性について検討を行う。

#### 4.3.1 解析条件

余震域と評価サイトを図4.7に示す。1923年関東地震を対象とし、本震マグニチュードはM7.9、余震域及び評価サイトは4.2節と同様なものとする。評価期間は本震発生から1時間、1日間、3日間、10日間と仮定する。提案モデルのパラメータの地震間誤差による余震ハザードへの影響は、3.3.3節の手法を用いて評価し、パラメータの平均値と平均 $+\sigma$ において余震ハザードを計算する。

余震発生モデルのパラメータの詳細を表4.2に示す。本震発生からの経過時間 $T_1$ が長くなる程、 $T_1$ の関数である $\log_{10}N(T_1, 4.0, M_m)$ 及び $b(T_1)$ は大きくなり、総余震数の増加し、全体の余震中の規模の小さい余震の割合が多くなるモデルとなっている。

表 4.2 評価期間毎の余震発生モデルのパラメータ ( $M_{\min}=4.0$ )

	$T_1=1$ [時間]		$T_1=1$ [日]		$T_1=3$ [日]		$T_1=10$ [日]	
	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差
$\log_{10}N(T_1,4,7.9)$	1.59	0.36	2.40	0.36	2.55	0.36	2.66	0.36
$b(T_1)$	0.60	0.12	0.70	0.12	0.73	0.12	0.77	0.12
$D_1$	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	0.5
$p$	1.05	0.17	1.05	0.17	1.05	0.17	1.05	0.17

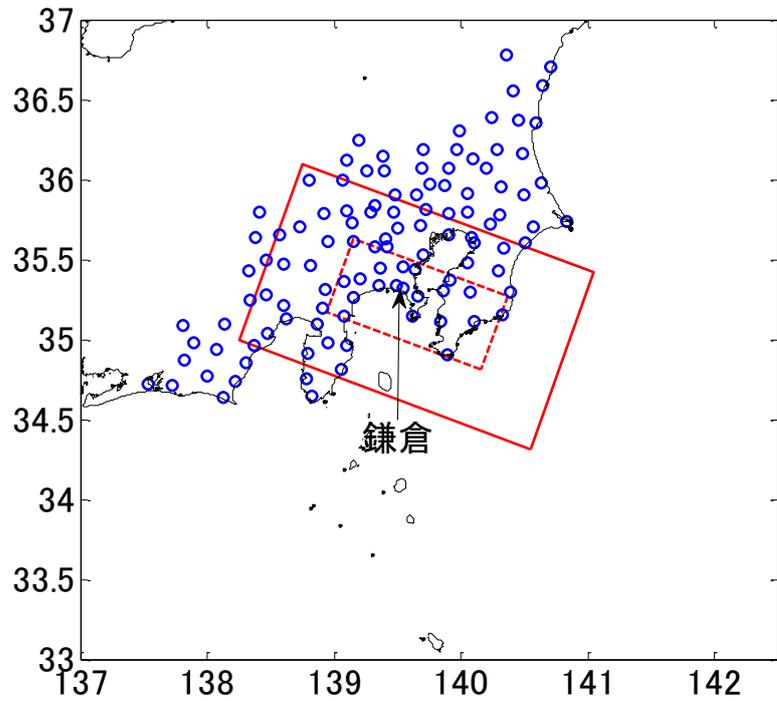


図 4.7 余震域と評価サイト

#### 4.3.2 鎌倉における余震ハザード結果

本震発生からの経過時間による余震ハザードマップの作成の前に、評価サイトの中から鎌倉を選び、その余震ハザード結果の分析を行う。鎌倉における本震発生から経過時間の変化による余震ハザード結果を図 4.8 に示す。ここで、鎌倉における工学的基盤上の本震 PGV は司・翠川の距離減衰式によって中央値で計算すると 48cm/s である。

本震発生から時間の経過と共に、余震ハザード結果は大きくなり、各評価期間においてこの本震 PGV を超える余震数は、1 時間、1 日間、3 日間、10 日間において、平均+ $\sigma$  でそれぞれ 0.023 回、0.087 回、0.10 回、0.11 回、平均でそれぞれ 0.0042 回、0.017 回、0.021 回、0.023 回となった。この結果を横軸に本震発生からの経過時間、縦軸に本震規模の地震動(PGV)を超える余震数とすると図 4.9 のように表すことが出来る。この結果から、本震 PGV を超える余震数は本震発生直後では経過時間と共に多くなるが、本震発生から 3 日(72 時間)程度経過するとその変化は小さくなることが分かり、本震発生から数時間適度の直後においては余震ハザードの変動に注意する必要があると考えられる。

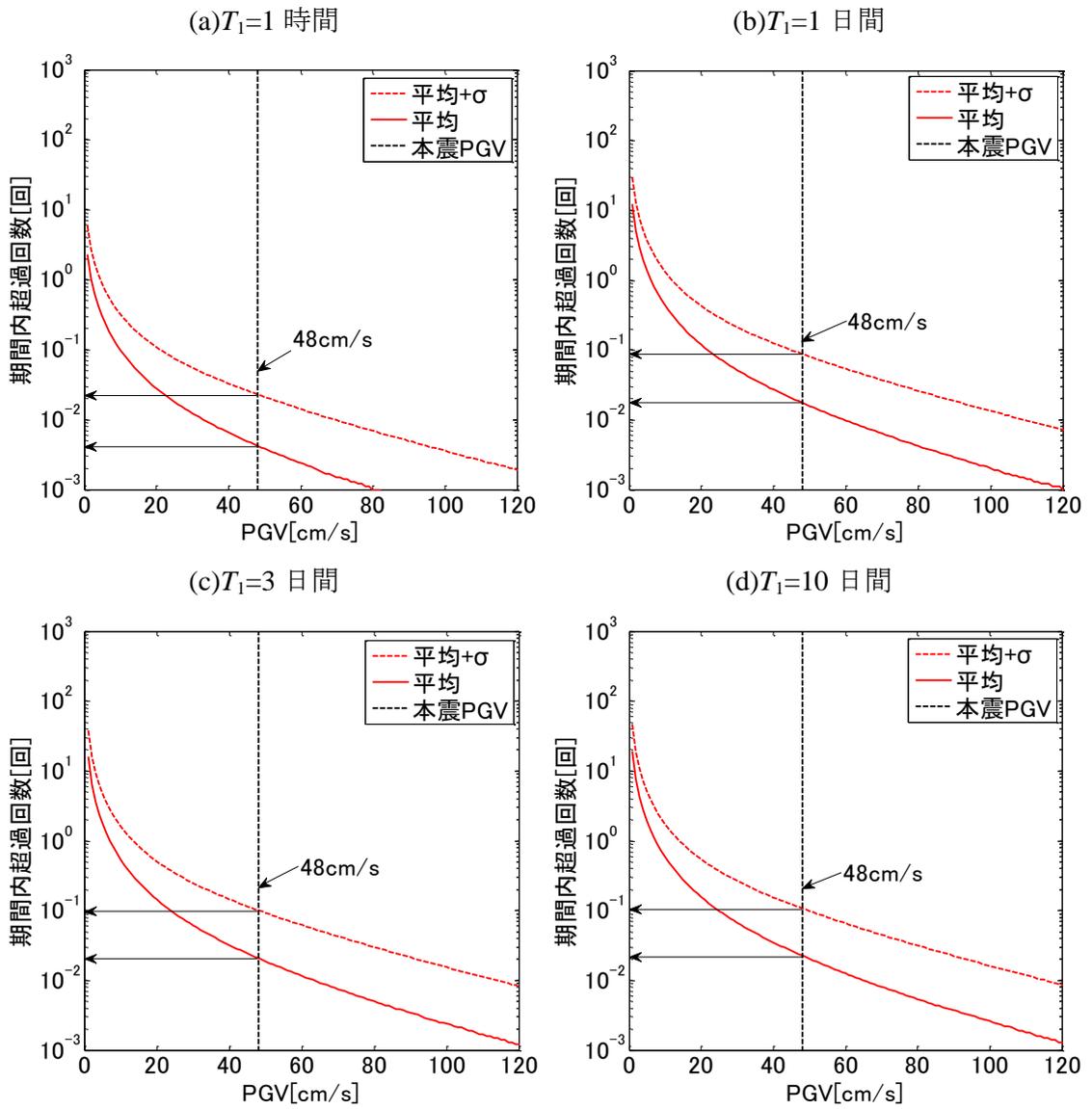


図 4.8 鎌倉における経過時間による余震ハザードの変化

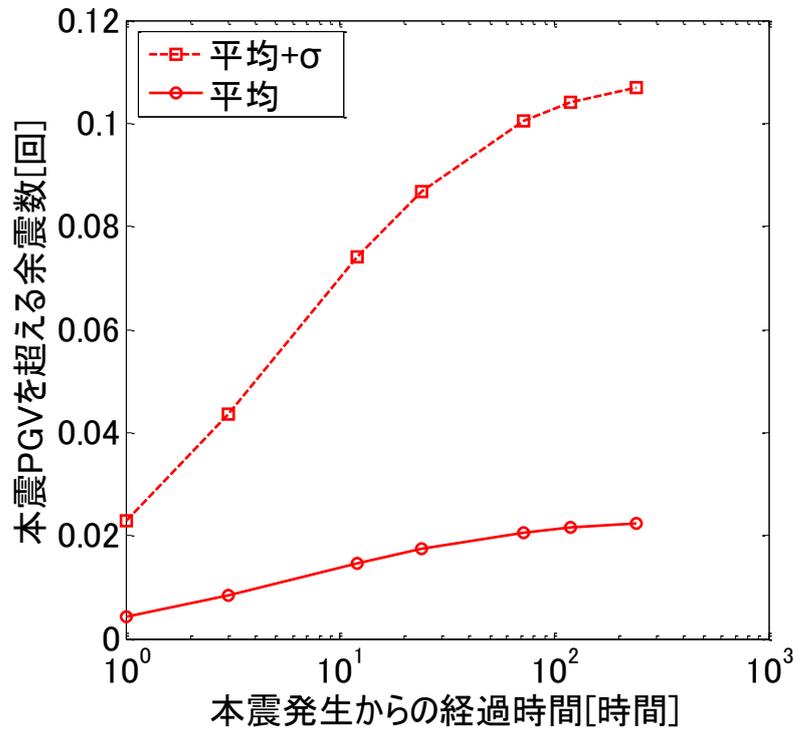


図 4.9 本震から時間経過による本震 PGV を超える余震数(@鎌倉)

### 4.3.3 時間経過による余震ハザードマップ

4.3.2 節と同様な分析を全評価サイトで行い、本震発生から経過時間による本震 PGV を超える余震発生数に関するハザードマップを作成する。まず、全ての評価サイトにおける本震による工学的基盤上の PGV の中央値は司・翠川の距離減衰式によって計算した図 4.4 を用いる。評価期間を 1 時間、1 日間、3 日間、10 日間に設定し、全ての評価サイトにおける確率論的余震ハザード評価を行い、本震 PGV を超える余震発生数を求めて、これによりハザードマップを作成する。ここで、地震間誤差を考慮した平均+ $\sigma$  による結果を図 4.12 に、地震間誤差を考慮しない平均による結果を図 4.13 にそれぞれ示す。

地震間誤差を考慮した場合、 $T_1=1$  時間では本震 PGV を超える余震発生数は最大で約 0.09 回となるが、本震発生からの時間経過によって、拡大断層面の深さが浅く本震 PGV が比較的小さい拡大断層面の南西側に位置する評価サイトを中心に本震 PGV を超える余震数が顕著に増加し、本震発生からの経過時間が 1 日間、3 日間、10 日間において、それぞれ最大約 0.42 回、0.52 回、0.60 回発生すると予測される。地震間誤差を考慮しない平均パラメータによる結果では、本震 PGV は変わらず、余震ハザード結果のみ小さくなるため、本震発生からの経過時間 1 時間、1 日間、3 日間、10 日間において、それぞれ最大約 0.03 回、0.16 回、0.20 回、0.23 回の結果となり、地震間誤差を考慮した場合に比べ、約 1/3 程度となった。

以上の結果から、本震 PGV を超える余震数は本震発生直後から約 3 日まで大きくなり、その後は収束する傾向が確認され、約 3 日までは本震規模の地震動を持つ余震に対して十分注意が必要であると考えられる。また、空間的には拡大断層面の深さが浅い領域周辺のサイトにおいて、本震 PGV を超える余震発生数が大きくなり、このような領域において特に本震規模の余震被害に注意が必要と考えられる。

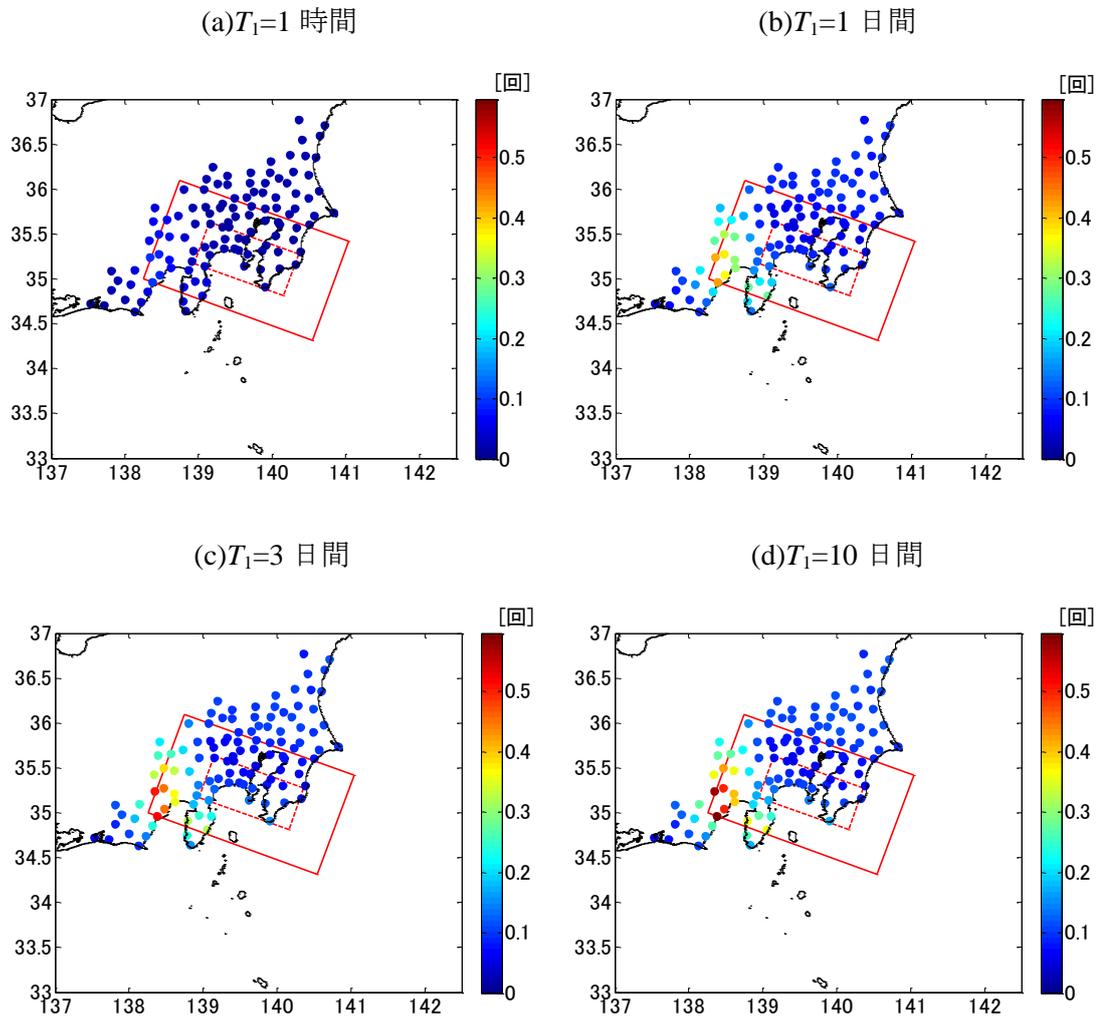


図 4.12 経過時間による本震 PGV を超える余震回数のハザードマップ (平均 $+\sigma$ )

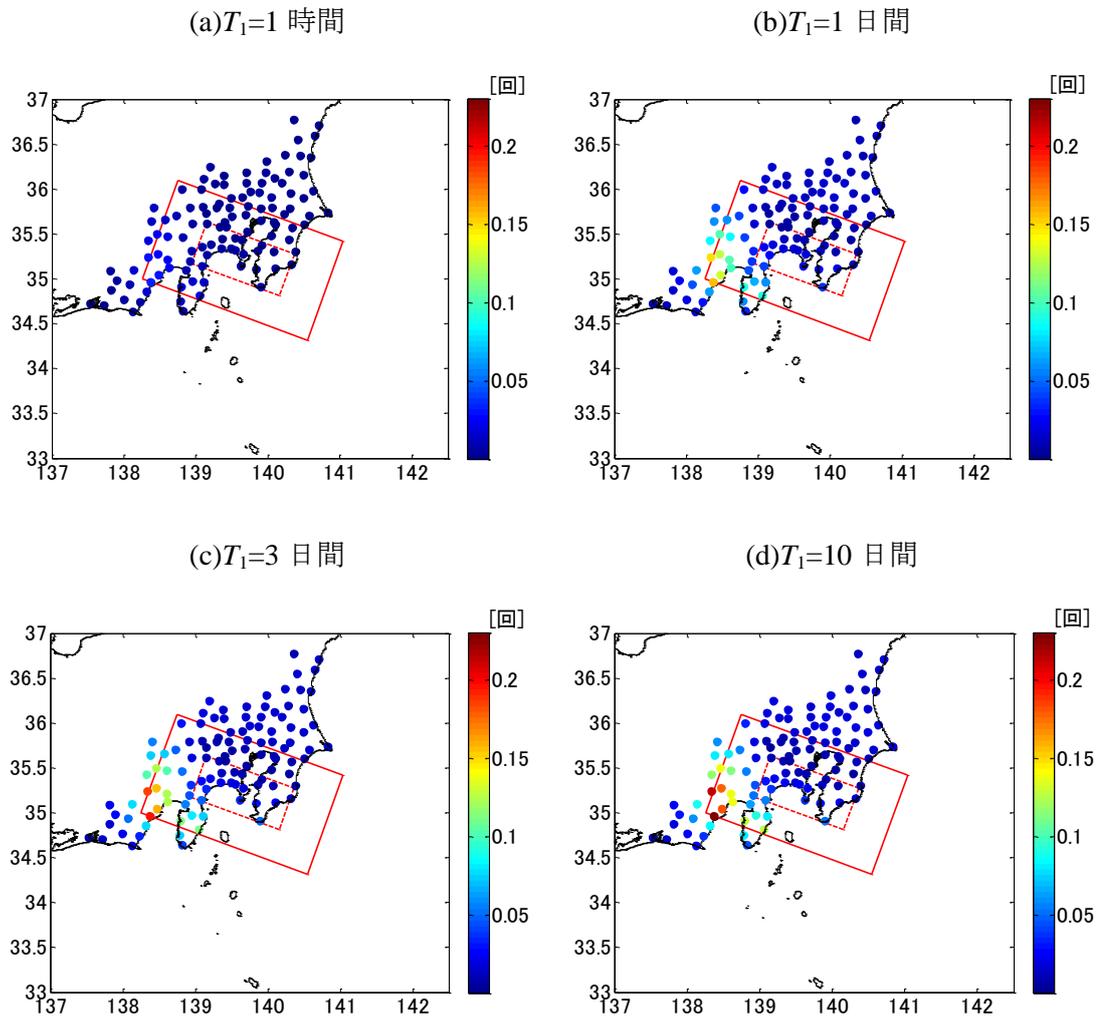


図 4.13 経過時間による本震 PGV を超える余震回数の余震ハザードマップ(平均)

#### 4.4 余震ハザードマップの応用

海溝型巨大地震後の復旧活動計画に活用するため、2章で提案した確率論的余震発生モデルと3章で提案した確率論的余震ハザード評価手法を用いて、本震PGVを超える余震発生数に関するハザードマップを提案した。

本研究ではその適用事例として、関東地震を対象とした首都圏における余震ハザードマップを作成したが、本震断層面の位置や本震規模、評価サイトを変えることで様々な条件における余震ハザードマップを作成することが出来る。

そして、本研究では本震発生直後に本震規模の余震が発生することに注目して、本震PGVを超える余震発生数に関するハザードマップを提案したが、本震発生からある程度時間が経過して本震PGVを超える余震発生数が十分小さくなった後は、震度5弱など使用目的に合った指標によるハザードマップを作成することも出来る。

また、使用目的に合う評価期間に設定することによって、海溝型巨大地震後の救助活動や避難計画、ライフライン復旧作業のような復旧計画はもちろん、本震発生から数時間の評価によって、工場生産ラインの中止の判断、鉄道運行の見合わせの判断などの意思決定の際にも応用することが出来ると考えられる。例えば、本震発生直後から1日間に本震PGVを超える余震数に関するハザードマップからライフライン復旧作業活動計画を立てることや、本震発生直後から3時間に本震PGVを超える余震数に関するハザードマップから危険地域を判断して、救助活動の優先順位を決めることなどの意思決定に役に立つと考える。

## 4.5 まとめ

本章では、2章と3章で提案した余震発生モデルと余震ハザード評価手法を用いて、復旧活動計画に活用するための余震ハザードマップを提案した。

4.2では、適用事例として、将来に本震マグニチュード7.9及び8.2の関東地震と同規模の地震が発生することを想定して、首都圏で応急活動期と復旧活動期における本震PGVを超える余震数に関するハザードマップの作成手法を提案した。

4.3では、4.2に続いて本震マグニチュード7.9の関東地震を対象に評価期間( $T_I$ )を数時間から10日までいろいろ変えながら余震ハザード評価を行い、余震ハザード評価における評価期間の影響を評価し、以下の知見を得た。

- ・鎌倉における本震PGVを超える余震発生数は本震発生直後から約3日まで大きくなり、その後は収束する傾向が確認され、約3日までは本震規模の地震動を持つ余震に対して十分注意が必要であると考えられる。
- ・余震ハザードマップによると、拡大断層面の浅い領域周辺のサイトにおいて、本震PGVを超える余震数が大きくなり、このような領域において特に本震規模の余震被害に注意が必要と考えられる。

4.4では、提案する余震ハザードマップの活用法に関する考察を行った。

#### 4 章の参考文献

- [1] Kobayashi and Koketsu : Source process of the 1923 Kanto earthquake inferred from historical geodetic, teleseismic, and strong motion data. /Earth Planets and Space/ 57 (4) : 261-270, 2005.3.
- [2] 佐藤良輔 : 日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 鹿島出版会, 1989.

## 第 5 章

# 耐津波設計における余震と津波の荷重組み合わせの提案

### 5.1 はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震の直後の東北地方沿岸部の広い範囲で 5m 以上の津波が来襲し、甚大な被害をもたらした。このように海溝型巨大地震が発生すると津波が発生する可能性があるため、海溝型巨大地震による津波の影響を受ける可能性のある海岸沿いの津波避難ビル、防潮堤、病院、原子力発電所等の施設においては耐津波設計を実施する必要がある。また、津波は本震発生から数分から数十分という短い時間で建築物に到達することもあるため、巨大地震直後に活発に発生する余震と同時に建築物に影響を与えることが考えられる。このように建物に余震荷重と津波荷重が同時に働く場合には、それぞれの設計荷重をどのように設定すれば適切なかが問題となる。例えば、余震荷重と津波荷重を共に最大値と考えれば、その組み合わせは過大評価となり、またそれぞれの荷重を共に平均値と考えれば、その荷重組み合わせは過小評価になりがちである。そのため、巨大地震直後の建物における余震と津波の荷重組み合わせを適切に評価することは、今後の耐津波設計において重要な課題になると考えられる。第 5 章では、耐津波設計における限界状態設計法に基づく余震と津波の荷重組み合わせ手法について提案する。

## 5.2 余震と津波の荷重組み合わせの評価手法

余震と津波の荷重組み合わせの概要を図 5.1 に示す。まず、海溝型巨大地震が発生すると評価サイトから断層面までの距離によって異なるが、数分から数十分後に津波が評価サイトに到達する。その後ある期間において、津波による荷重効果が構造物に影響を与える。津波到達時刻を本震発生から経過時間で評価し  $t_a$ [分] と、その津波の影響が終わる時刻を本震発生からの経過時間  $t_e$ [分] と設定し、津波継続時間は  $t_e - t_a$ [分] で表すことができる。一方、余震による荷重効果は本震発生直後から断続的に存在し、津波と余震が同時に構造物に影響を与えるのは、津波到達時刻から津波終了時刻の間である津波継続期間である。この期間においてばらつきを有する余震と津波による荷重効果の組み合わせを評価するため、限界状態設計法を使用した信頼性解析を行い、その結果から荷重及び耐力係数を提案し、今後の津波避難ビルの耐津波設計に活用することを考える。

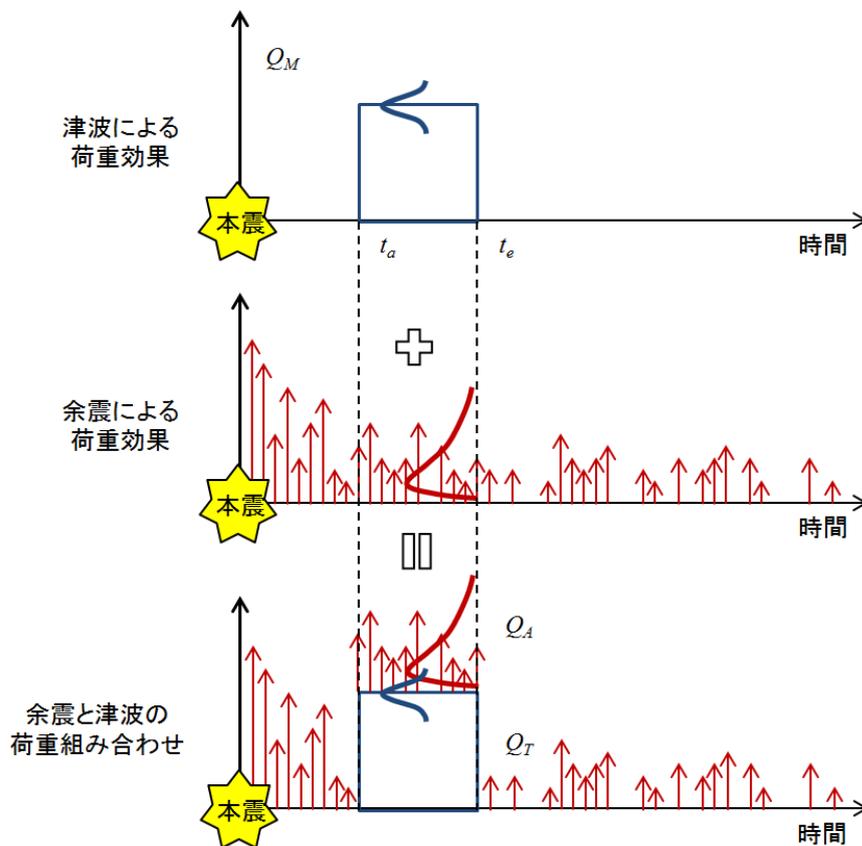


図 5.1 余震と津波の荷重組み合わせの概要

### 5.2.1 解析条件

本研究では、津波によって甚大な被害を受けた 2011 年東北地方太平洋沖地震を適用事例とし、評価サイトを釜石と仮定した余震と津波の荷重組み合わせの評価手法を検討する。東北地方太平洋沖地震の余震域と評価サイトである釜石の K-NET 所在地(北緯 39.27、東経 141.86)の位置を図 5.2 に示す。

解析対象建物は、海岸沿いに位置した海溝型巨大地震後に地域住民の避難場所となる津波避難ビルと仮定する。この津波避難ビルは鉄筋コンクリート造(RC 造)の 10 階建てとし、幅  $B=40\text{m}$ 、奥行  $L=20\text{m}$ 、建物高さ  $H=40\text{m}$  であると仮定する。

余震と津波による荷重組み合わせを考慮する際に、評価サイトにおける津波到達時刻( $t_a$ )と津波終了時刻( $t_e$ )が重要である。日本近海で発生した地震の場合、津波の第一波が到達するのは、本震発生から数分から数十分と知られているが、津波継続時間に関しては明確になっていないのが現状である。なお、津波第一波が必ずしも最大津波とは限らないため、最大津波の到達に関する評価には注意が必要である。本研究では、図 5.3 に示す港湾空港技術研究所の岩手南部沖における津波の観測結果<sup>[1]</sup>を参考に、津波到達時刻( $t_a$ )を本震発生からの経過時間 0、30、60 分とし、津波継続時間( $t_e-t_a$ )は一律で 30 分間とし、津波継続時間における浸水深は一定であると仮定するが、津波到達時刻、継続時間、津波継続時間における浸水深に関するより詳細なモデル化は今後の課題とする。

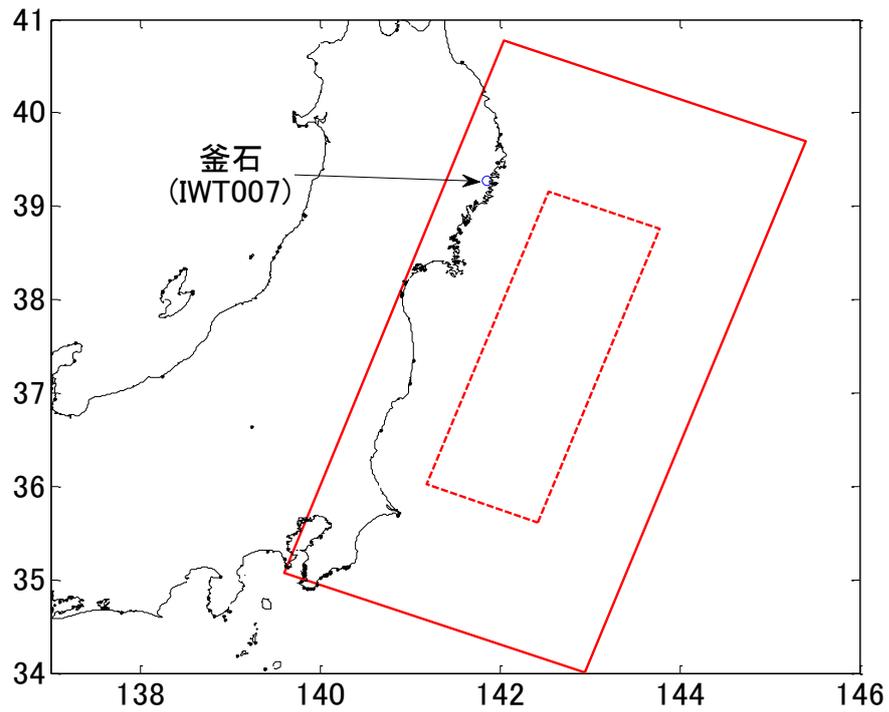


図 5.2 余震域と評価サイト

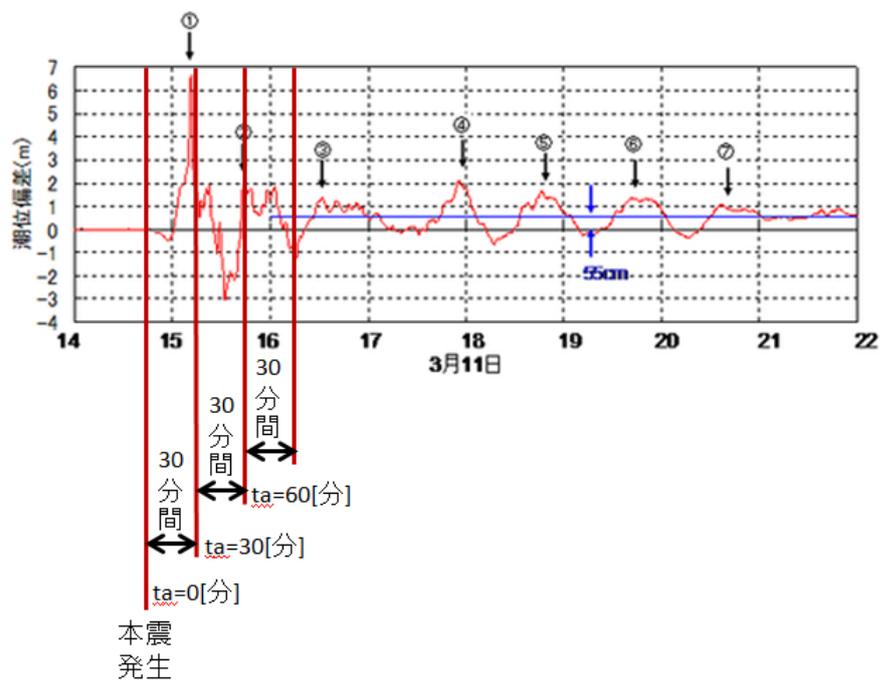


図 5.3 岩手南部沖 GPS 波浪計で捉えた津波の初期の波形  
(港湾空港技術研究所 (2011) に加筆)

## 5.2.2 荷重及び耐力のモデル化

### (1) 算出手法

津波避難ビルに対する余震と津波の荷重組み合わせに関する設計式の算出を行う。AISCのLRFD(Load and Resistance Factor Design)<sup>[2]</sup>照査式は以下の(5.1)式のように表せる。

$$\phi R_n > \sum \gamma_i Q_{in} \quad (5.1)$$

ここで、 $R_n$ 、 $Q_{in}$ はそれぞれ耐力の公称値、荷重効果の代表値であり、 $\phi$ 、 $\gamma_i$ は耐力係数、荷重係数である。

最下層の層せん断力に注目した本震発生後の津波と余震による限界状態関数  $G$  は次のように表される。

$$G = R - (Q_A + Q_T) \quad (5.2)$$

ここで、 $R$ 、 $Q_A$ 、 $Q_T$  はそれぞれ本震後の保有水平耐力、本震発生からの経過時間  $t_a$  から  $t_e$  までの余震による荷重効果、本震発生からの時刻  $t_a$  から  $t_e$  までの津波による荷重効果である。このとき、LRFD式は以下のように表せる。

$$\phi R_n > \gamma_A Q_{An} + \gamma_T Q_{Tn} = \gamma_A (r \cdot Q_{Mn}) + \gamma_T Q_{Tn} = \gamma_M Q_{Mn} + \gamma_T Q_{Tn} \quad (5.3)$$

ここで、 $Q_{An}$ 、 $Q_{Tn}$ 、 $Q_{Mn}$ 、 $R_n$  はそれぞれ本震発生後  $t_a$  から  $t_e$  までの余震、津波、本震による荷重効果、保有水平耐力の代表値であり、 $\gamma_A$ 、 $\gamma_T$ 、 $\gamma_M$ 、 $\phi$  は余震、津波、本震の荷重係数及び耐力係数である。 $r(=Q_{An}/Q_{Mn})$  は本震による荷重効果の代表値に対する本震発生からの時刻  $t_a$  から  $t_e$  までの余震による荷重効果の代表値の比であり、これを用いることで余震による荷重効果を本震による荷重効果で表すことが出来る。各項目の詳細に関しては以下で説明する。

(2) 余震による荷重効果  $Q_A$  のモデル化

$i$  層の地震層せん断力は下式<sup>[3]</sup>により算定する。

$$V_{Ei} = k_{Di} k_{Fi} k_{Vi} \frac{\mu_m S_a(T_i, \zeta_i)}{g} \sum_{k=i}^n w_k \quad (5.4)$$

ここで、 $k_{Di}$ ：建築物の塑性変形能力による低減係数、 $k_{Fi}$ ：建築物の不整形性による割増係数、 $k_{Vi}$ ： $i$  層の地震層せん断力係数の分布を表す係数、 $\mu_m$ ：多自由度系を 1 自由度系で評価したときの補正係数、 $S_a(T_i, \zeta_i)$ ：固有周期  $T_i$ 、減衰定数  $\zeta_i$  の加速度応答スペクトル値、 $g$ ：重力加速度[cm/s<sup>2</sup>]、 $w_k$ ： $k$  層の重量[kN]である。

本研究では最下層の層せん断力に注目するため、 $k_{D1}=1$ 、 $k_{F1}=1$ 、 $k_{V1}=1$ 、 $\mu_m=0.82$  と仮定し、工学的基盤面での卓越周期とすると加速度応答スペクトルは  $S_a(T_1, 0.05) = k_{rE} \cdot PGA \cdot S_{a0}(T_1, 0.05) = k_{rE} \cdot PGA \cdot k_{R0}$  と変換でき、 $k_{rE}=1$ 、 $k_{R0}=2\sim3$  程度の値とすると、(5.4)式は下式のように表せる。

$$Q_A = V_{E1} \approx \frac{2PGA}{980} \sum_{k=1}^n w_k \quad (5.5)$$

ここで、 $PGA$  は余震による最大加速度[cm/s<sup>2</sup>]である。RC 造の単位面積当たり重量を 13kN/m<sup>2</sup> とすると、対象建物の総重量は  $\sum_{k=1}^{10} w_k = 13 \times 40 \times 20 \times 10 = 104000$  [kN]となる。

余震による  $PGA$  は、2 章で提案した確率論的余震発生モデルと 3 章の余震ハザード評価手法を用いて計算することが出来る。まず、本震マグニチュード  $M_m=9.0$  と本震から経過時間  $T_1=30, 60, 90$ [分]における確率論的余震発生モデルのパラメータの諸元を表 5.1 に示す。

表 5.1 確率論的余震発生モデルのパラメータ諸元

$T_1$ [分]	$b(T_1)$		$p$		$D_1$		$\log_{10}N(T_1,4.0,9.0)$	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
30	0.58	0.12	1.05	0.17	1.00	0.50	1.92	0.36
60	0.60	0.12	1.05	0.17	1.00	0.50	2.19	0.36
90	0.62	0.12	1.05	0.17	1.00	0.50	2.33	0.36

次に、表 5.1 のパラメータを用いて、評価期間である津波継続時間、つまり本震発生後 0 分から本震発生後 30 分まで、本震発生後 30 分から本震発生後 60 分まで、本震発生後 60 分から本震発生後 90 分までの釜石における余震ハザードを 3 章で提案した余震ハザード評価手法を用いて計算する。ただし、3 章では地震動指標として PGV を使用したが、ここでは PGA を使うため、(3.2)式の司・翠川の距離減衰式の PGV に関する係数の代わりに、(5.6)式に示す司・翠川の距離減衰式の PGA に関する係数を使って余震ハザードを計算する。また、PGA に対する地盤増幅率  $R$  は 1.4 倍とする。

$$\begin{aligned}\log_{10} Y_{bed} &= \hat{b} - \log(X + \hat{c}) - 0.003X \\ \hat{b} &= 0.50M + 0.0043D + 0.62 + \varepsilon \\ \hat{c} &= 0.0055 \cdot 10^{0.50M}\end{aligned}\tag{5.6}$$

確率論的余震発生モデルのパラメータに含まれている地震間誤差を考慮する手法として、3.3.3 節の評価手法を用い、余震ハザードにおける地震間誤差による標準偏差( $\sigma$ )を計算し、平均及び平均+ $\sigma$ における PGA の余震ハザードを計算する。ただし、3 章では余震ハザード曲線は超過回数の形で提案したが、ポアソン過程の場合(5.7)式によって超過確率を算定することが出来、以上で求めた平均、平均+ $\sigma$  の余震ハザード結果を平均値と標準偏差を計算し、表 5.2 に示す。

$$P(Y_{surf} > y | t_a \leq t < t_e, M_m) = 1 - \exp\left\{-\left(N(Y_{surf} > y | T_e, M_m) - N(Y_{surf} > y | T_a, M_m)\right)\right\}\tag{5.7}$$

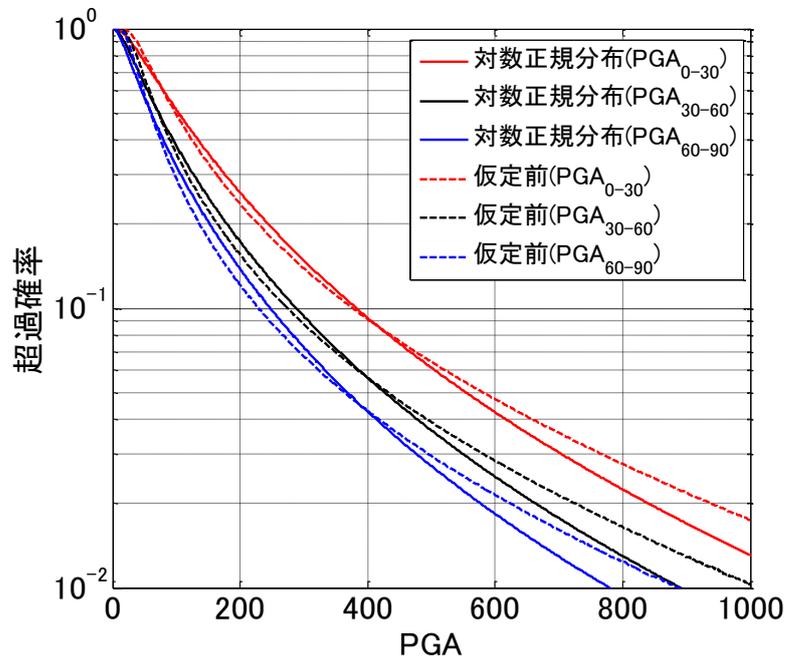
表 5.2 余震ハザード結果

パラメータ	平均値	標準偏差	備考
$PGA_{0-30}[\text{cm/s}^2]$	174	235	平均
	373	390	平均+ $\sigma$
$PGA_{30-60}[\text{cm/s}^2]$	130	194	平均
	276	325	平均+ $\sigma$
$PGA_{60-90}[\text{cm/s}^2]$	111	171	平均
	232	294	平均+ $\sigma$

次に、信頼性解析の手法である AFOSM(Advanced First-Order Second-Moment)<sup>[4]</sup>では確率パラメータの分布形までを必要とする。そこで、余震ハザードの分布形が対数正規分布に適用可能と考え、表 5.2 で求めた余震ハザード結果の平均および標準偏差と等しくなるような対数正規分布と仮定し、余震による荷重効果のモデル化を行った。余震ハザード結果が対数正規分布と仮定したことを検証するため、対数正規分布と仮定する前の余震ハザード結果と対数正規分布と仮定した余震ハザード結果との比較を図 5.4 に示す。比較結果、地震間誤差の考慮の有無にかかわらず対数正規分布に仮定する前と後の分布はある程度一致することが確認され、余震ハザード曲線を対数正規分布にモデル化することが出来ると考えられる。

以上で求めた、対数正規分布で表現した余震ハザードモデルの平均値及び変動係数(=標準偏差/平均値)を表 5.3 に示す。

(a) 地震間誤差を考慮しない場合 (平均)



(b) 地震間誤差を考慮する場合 (平均+ $\sigma$ )

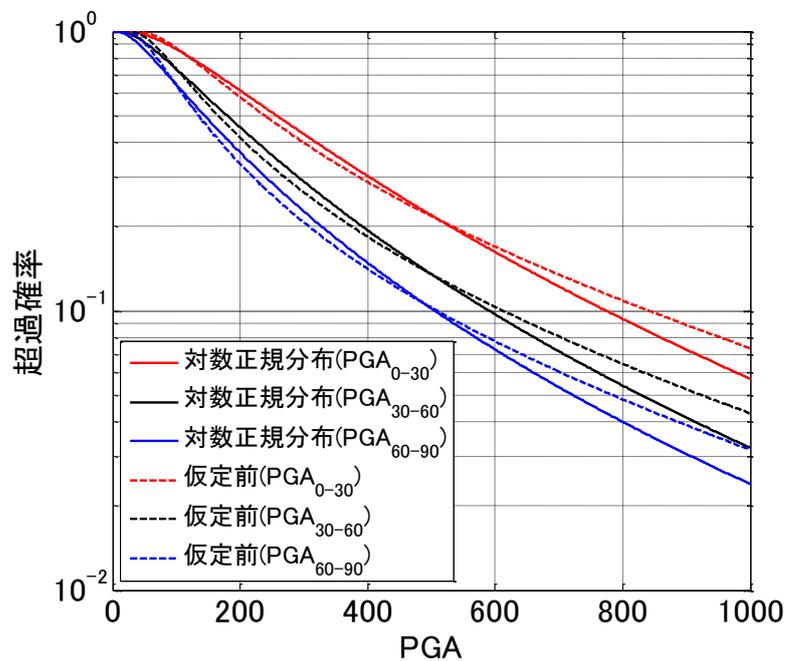


図 5.4 余震ハザードを対数正規分布に仮定した結果と仮定前の結果の比較

### (3) 津波荷重 $Q_T$ のモデル化

津波波圧と津波波力の概要<sup>[5]</sup>を図 5.5 に示す。まず、構造設計用の進行方向の津波波圧は、下式により算定する。

$$qz = \rho g (3h - z) \quad (5.8)$$

ここで、 $qz$ : 構造設計用の進行方向の津波波圧[kN/m<sup>2</sup>]、 $\rho$ : 水の単位体積質量[ton/m<sup>3</sup>]、 $g$ : 重力加速度[m/s<sup>2</sup>]、 $h$ : 設計用浸水深[m]、 $z$ : 当該部分の地盤面からの高さ ( $0 \leq z \leq 3h$ )[m]である。

津波波力は、(5.8)式の津波波圧が同時に生じると仮定し、下式により算定する。

$$Q_T = \rho g B \int_{z_1}^{z_2} (3h - z) dz = \frac{1}{2} \rho g B \{ (6hz_2 - z_2^2) - (6hz_1 - z_1^2) \} \quad (5.9)$$

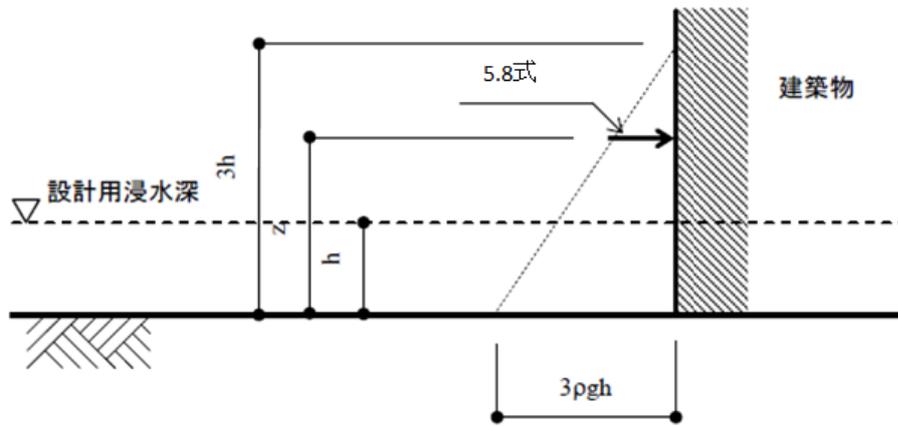
ここで、 $Q_T$ : 構造設計用の進行方向の津波波力[kN]、 $B$ : 当該部分の対象建築物の幅[m]、 $z_1$ : 受圧面の最小高さ ( $0 \leq z_1 \leq z_2$ )[m]、 $z_2$ : 受圧面の最高高さ ( $z_1 \leq z_2 \leq 3h$ )[m]である。なお、建築物の高さが  $3h$  以下の場合は、津波波圧が図 5.5 の(c)に示すような台形となるため、この分布を積分して津波波力を求める。

津波浸水深  $h$ [m]の平均値は(5.10)式に表した阿部の津波予測式(1989)<sup>[6]</sup>によって求め、そのばらつきは Aida(1978)<sup>[7]</sup>によって得られた結果である常用対数標準偏差 0.4 とし、確率分布形は対数正規分布と仮定してモデル化を行う。

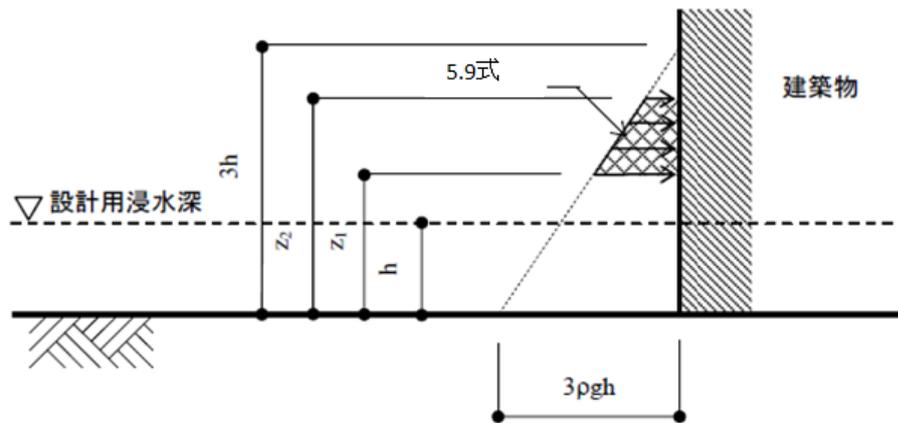
$$\log_{10} \bar{h} = M_m - \log_{10} \Delta - 5.55 + C \quad (5.10)$$

ここで、 $\bar{h}$ は数キロメートルの区間での平均津波高、 $M_m$ は本震マグニチュード、 $\Delta$ は震央から観測点までの最短津波伝播距離、 $C$ は補正項であり太平洋側で  $C=0$ 、日本海側で  $C=0.2$  としている。

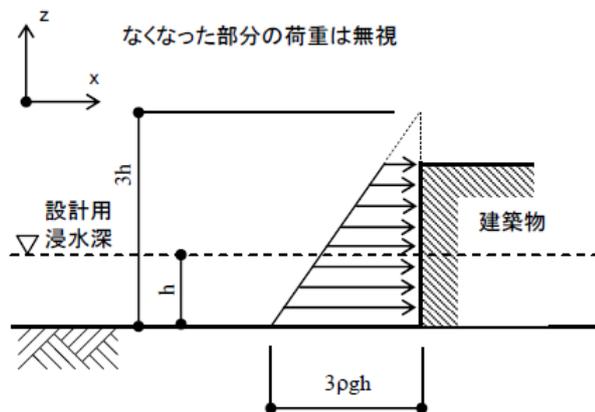
2011年東北地方太平洋沖地震( $M_m=9.0$ )の場合の釜石における平均浸水深は(5.10)式によると約 18m となる。この値を基準とし、津波浸水深に違いによる余震の影響を比較するため、基準の 2/3、1/3 に相当する 12m、6m の場合についても解析を行う。



(a) 5.8式による津波波圧



(b) 建物の高さが 3h 以上の場合の津波波力



(c) 建物の高さが 3h 以下の場合の津波波力

図 5.5 津波波圧及び津波波力の概要

(津波避難ビル等に係るガイドライン、2005)

(4) 保有水平耐力  $R$  のモデル化

保有水平耐力  $R$  の平均値は目標信頼性指標( $\beta_T$ )によって決まり、その変動係数は0.2、確率分布形は対数正規分布と仮定した。ここで、信頼性指標  $\beta$  は、破壊確率  $P_f$  と次式<sup>[8]</sup>の関係にあり、この関係を図 5.6 に示す。

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (5.11)$$

ここで、 $\Phi$  は標準正規確率分布関数である。

表 5.3 荷重・耐力モデルの諸元

パラメータ	平均値	変動係数	確率分布形	備考
$PGA_{0-30}[\text{cm/s}^2]$	174	1.35	対数正規	平均
	373	1.05	対数正規	平均+ $\sigma$
$PGA_{30-60}[\text{cm/s}^2]$	130	1.49	対数正規	平均
	276	1.18	対数正規	平均+ $\sigma$
$PGA_{60-90}[\text{cm/s}^2]$	111	1.54	対数正規	平均
	232	1.26	対数正規	平均+ $\sigma$
津波浸水深 $h[\text{m}]$	18	0.42	対数正規	平均
	12	0.42	対数正規	阿部式の 2/3
	6	0.42	対数正規	阿部式の 1/3
保有水平耐力 $R[\text{kN}]$	-	0.2	対数正規	

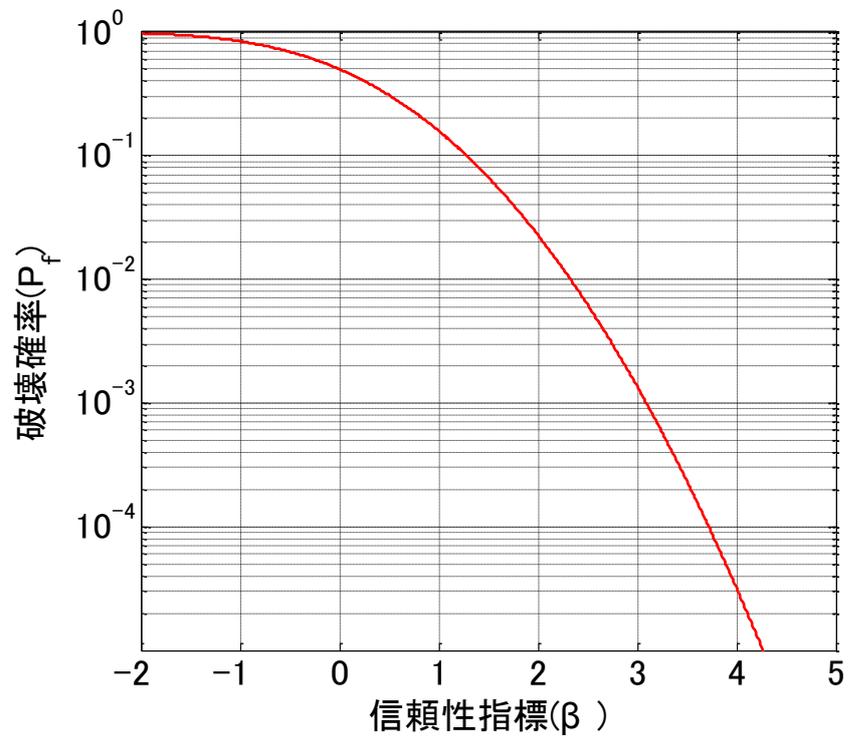


図 5.6 信頼性指標(β)と破壊確率(P<sub>f</sub>)の関係

### 5.2.3 解析手法

解析手法は AFOSM を採用し、目標信頼性指標  $\beta_T$  を 0 から 1.0 まで 0.1 間隔で変えながら、余震と津波の荷重組み合わせの設計点を計算する。解析の流れ<sup>[8]</sup>を図 5.7 に示す。

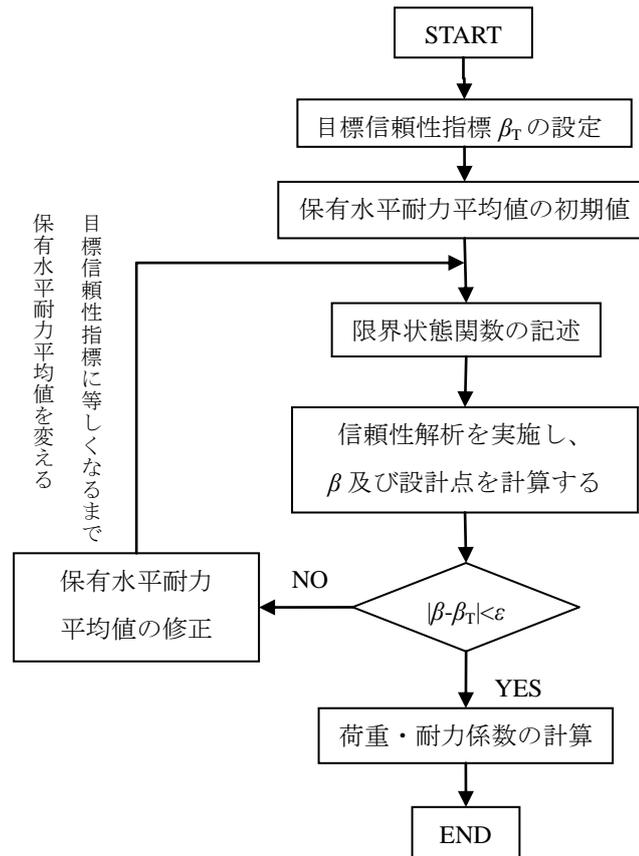


図 5.7 荷重・耐力係数の算定フロー

(建築物の限界状態設計指針(2002、日本建築学会)を参考に作成)

### 5.3 解析結果

平均浸水深毎の余震 PGA 設計点を図 5.8 に、本震 PGA に対する余震 PGA 設計点の比率  $r$  を図 5.9 に、余震による荷重効果を図 5.10 に示す。

まず、平均浸水深が 18m の場合の余震 PGA の設計点について検討を行う。図 5.8(a) には地震間誤差を考慮せず、平均パラメータによる余震モデルを用いた結果、図 5.8(b) には地震間誤差を考慮した、平均+ $\sigma$  のパラメータによる余震モデルの結果である。図 5.8(a) によると、表 5.3 の余震入力パラメータの平均値の影響により、0-30 分、30-60 分、60-90 分の評価期間順に余震 PGA の設定点が大きいくことが分かる。図 5.8(b) でも、同様な順番となっているが、その大きさは平均パラメータの結果より約 2.5 倍大きい結果となった。次に、図 5.8(c) 及び 5.8(d) の平均浸水深が 12m の場合、平均浸水深 18m の余震 PGA 結果と比べ、目標信頼性指標が 0 では変化が見られないが、目標信頼性指標が大きくなることによって、余震 PGA の設計点結果が少し大きくなる事が分かる。また、図 5.8(e) 及び 5.8(f) の平均浸水深が 6m の場合は、その増加率をもっと大きく、平均+ $\sigma$  の 0-30 分での目標信頼性指標が 1 の場合、余震 PGA の設計点は約  $550\text{cm/s}^2$  となった。この結果から、平均浸水深が低い程、目標信頼指標の高い場合、つまり破壊確率の低い場合の余震 PGA の設計点が大きくなる事が分かる。

釜石における地盤増幅率を考慮した本震 PGA の中央値は  $533[\text{cm/s}^2]$  であり、この本震 PGA に対する図 5.8 の余震 PGA の比率  $r$  を図 5.9 に示した。平均浸水深 18m の平均パラメータによる結果では、0-30 分、30-60 分、60-90 分でそれぞれ 0.2 倍、0.15 倍、0.12 倍であり、平均+ $\sigma$  による結果では、それぞれ 0.58、0.39、0.30 倍となった。この結果から、平均津波浸水深 18m の場合、余震 PGA 設計点の本震 PGA に対する比率を確認することが出来る。また、平均浸水深が低くなるその比率は大きくなり、平均浸水深が 6m の平均+ $\sigma$  において、目標信頼性指標が 1 の場合には本震に対する比率が 1.07 となり、本震 PGA より大きい余震設計点となることもあった。

図 5.10 には図 5.8 の余震 PGA 設計点を用いて(5.5)式から計算した、余震による荷重効果[kN]を示す。

次に津波浸水深の設計点を図 5.11 に、津波による荷重効果を図 5.12 に示す。

まず、平均浸水深 18m の津波浸水深  $h$  の設計点は、平均モデルと平均+ $\sigma$  及び評価

期間にかかわらず、目標信頼性指標が 0 の場合に 16m、目標信頼性指標が 1 の場合に 24m となった。平均浸水深 12m の場合も、平均モデルと平均+ $\sigma$  及び評価期間にかかわらず、目標信頼性指標 0 で 11m、目標信頼性指標 1 で 16m となった。しかし、平均浸水深 6m の場合は、地震間誤差を考慮しない平均モデルにおいて、目標信頼性指標 0 で 5.5m、目標信頼性指標 1 で約 8m であり、平均+ $\sigma$  モデルにおいては、目標信頼性指標 0 で 5.5m、目標信頼性指標 1 では評価期間 0-30 分、30-60 分、60-90 分の順に 6.3m、6.5m、6.9m であり、評価期間による影響が表れた。これは津波による荷重効果が比較的小さい一方、余震による荷重効果が大きいことが原因であると考えられる。図 5.12 には図 5.11 で得られた設計浸水深を用いて(5.9)式から計算された、津波荷重効果[kN]を示す。

図 5.13 には津波による荷重効果に対する余震による荷重効果を比率で示す。全てのケースにおいて、0-30 分、30-60 分、60-90 分の順に余震荷重効果が大きいため、津波による荷重効果に対する余震による荷重効果を比率も同様な順番になる。また、地震間誤差を考慮しないモデルが考慮したモデルより比率が低いことが分かる。平均浸水深 18m 及び 12m の場合、余震荷重効果は津波荷重効果に比べ十分小さく、平均浸水深 18m の場合、平均で約 0.1 倍以下、平均+ $\sigma$  で約 0.2 倍以下、平均浸水深 12m の場合、平均で約 0.2 倍以下、平均+ $\sigma$  で 0.5 倍以下となった。しかし、平均浸水深 6m の場合、0-30 分の平均で最大 0.92 倍、さらに平均+ $\sigma$  では 0-30 分、30-60 分、60-90 分でそれぞれ最大 3.2 倍、2.2 倍、1.7 倍となり、余震による荷重効果が津波による荷重効果より大きい場合もあった。

保有水平耐力の設計点を図 5.14 に示す。余震による荷重効果及び津波による荷重効果が共に大きい平均浸水深 18m の平均+ $\sigma$  モデルが最大となり、余震による荷重効果及び津波による荷重効果が共に小さい平均浸水深 6m の平均モデルが最小となった。

以上の余震と津波の荷重組み合わせによる設計点の結果を用いて、各荷重及び保有水平耐力の平均値に対する設計点に関する係数を図 5.15~5.17 に示し、目標信頼性指標( $\beta_T$ )が 0、0.5、1.0 における係数による設計式を式(5.12)~(5.29)に提案する。

[平均津波浸水深  $\mu_h=18$  の場合]

$\beta_T=0$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.98R_n > 0.12Q_{Mn} + 0.82Q_{Tn} \quad (5.12)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.98R_n > 0.33Q_{Mn} + 0.82Q_{Tn} \quad (5.13)$$

$\beta_T=0.5$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.95R_n > 0.13Q_{Mn} + 1.10Q_{Tn} \quad (5.14)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.95R_n > 0.41Q_{Mn} + 1.10Q_{Tn} \quad (5.15)$$

$\beta_T=1.0$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.91R_n > 0.14Q_{Mn} + 1.44Q_{Tn} \quad (5.16)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.91R_n > 0.47Q_{Mn} + 1.43Q_{Tn} \quad (5.17)$$

[平均津波浸水深  $\mu_h=12$  の場合]

$\beta_T=0$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.98R_n > 0.12Q_{Mn} + 0.85Q_{Tn} \quad (5.18)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.98R > 0.33Q_{Mn} + 0.85Q_{Tn} \quad (5.19)$$

$\beta_T=0.5$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.95R_n > 0.14Q_{Mn} + 1.25Q_{Tn} \quad (5.20)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.95R_n > 0.45Q_{Mn} + 1.24Q_{Tn} \quad (5.21)$$

$\beta_T=1.0$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.92R_n > 0.15Q_{Mn} + 1.77Q_{Tn} \quad (5.22)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.92R_n > 0.59Q_{Mn} + 1.74Q_{Tn} \quad (5.23)$$

[平均津波浸水深  $\mu_h=6$  の場合]

$\beta_T=0$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.98R_n > 0.12Q_{Mn} + 0.85Q_{Tn} \quad (5.24)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.98R_n > 0.33Q_{Mn} + 0.85Q_{Tn} \quad (5.25)$$

$\beta_T=0.5$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

$$0.95R_n > 0.23Q_{Mn} + 1.20Q_{Tn} \quad (5.26)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

$$0.95R_n > 0.72Q_{Mn} + 1.06Q_{Tn} \quad (5.27)$$

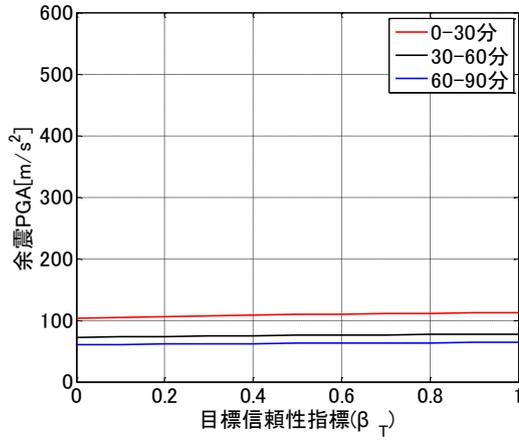
$\beta_T=1.0$  の場合

地震間誤差を考慮しない時の荷重及び耐力係数

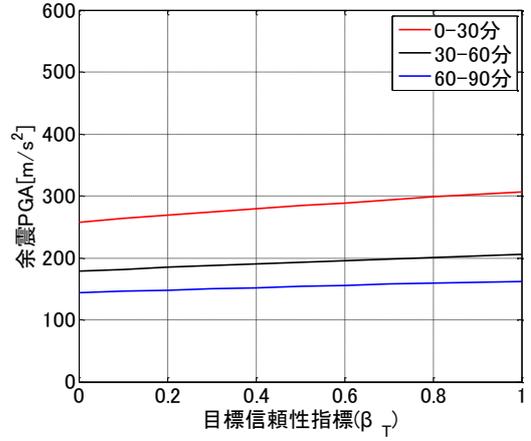
$$0.92R_n > 0.50Q_{Mn} + 1.72Q_{Tn} \quad (5.28)$$

地震間誤差を考慮する時の荷重及び耐力係数

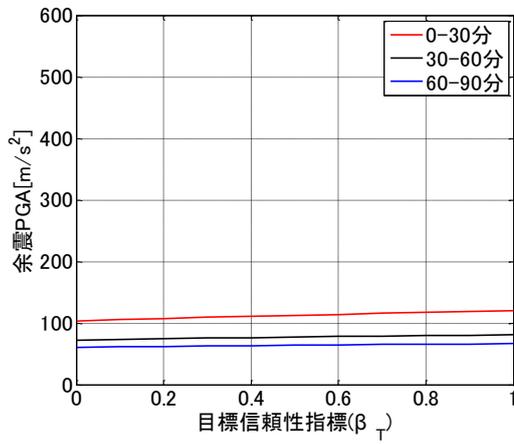
$$0.93R_n > 1.63Q_{Mn} + 1.20Q_{Tn} \quad (5.29)$$



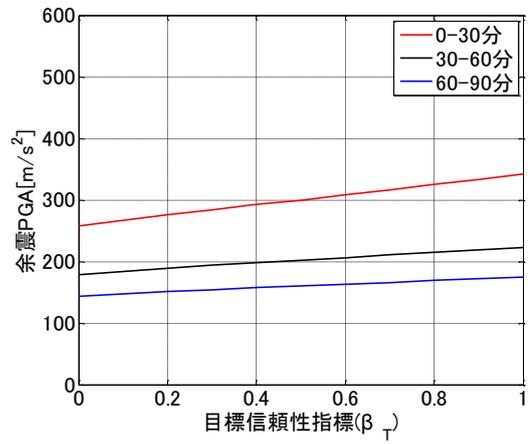
(a) 平均浸水深=18m、平均



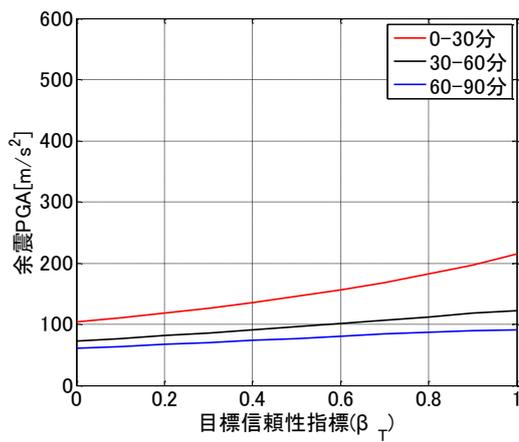
(b) 平均浸水深=18m、平均+ $\sigma$



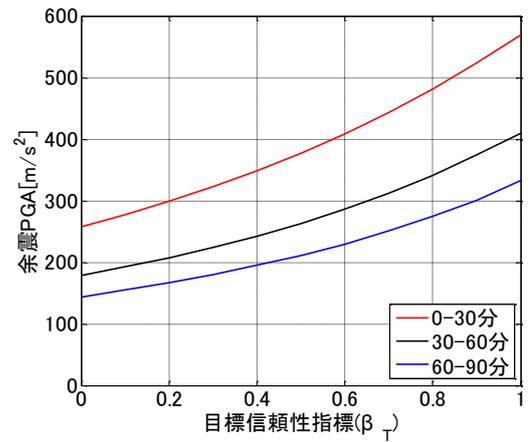
(c) 平均浸水深=12m、平均



(d) 平均浸水深=12m、平均+ $\sigma$

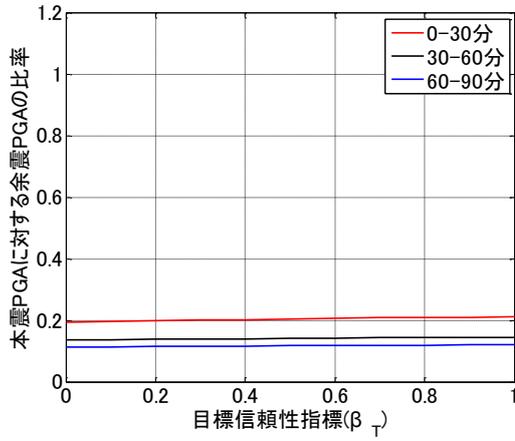


(e) 平均浸水深=6m、平均

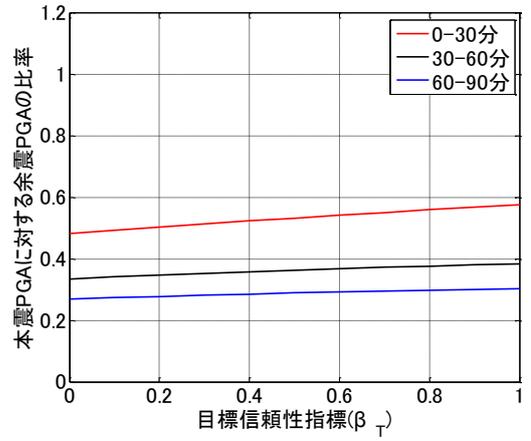


(f) 平均浸水深=6m、平均+ $\sigma$

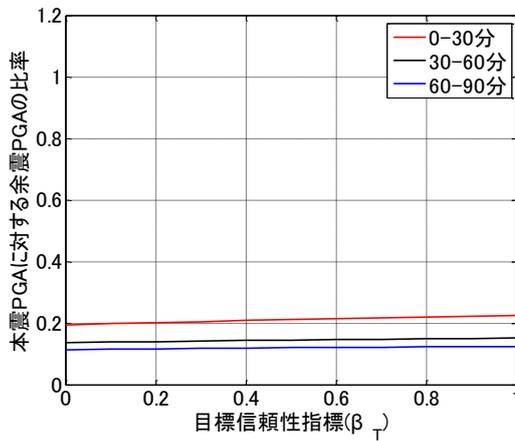
図 5.8 余震 PGA の設計点 [ $m/s^2$ ]



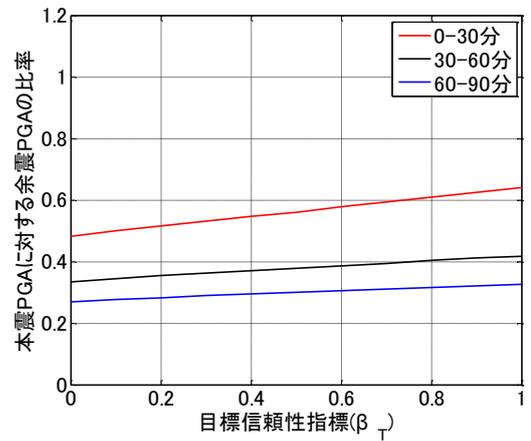
(a) 平均浸水深=18m、平均



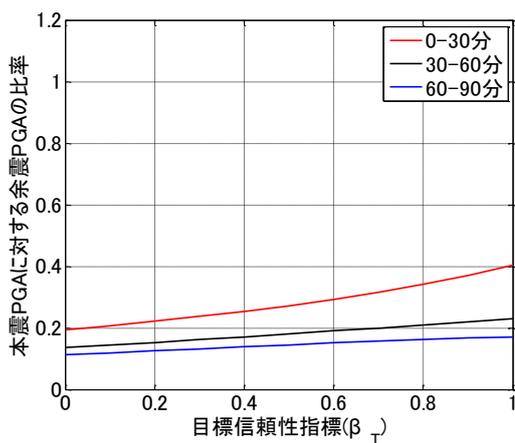
(b) 平均浸水深=18m、平均+σ



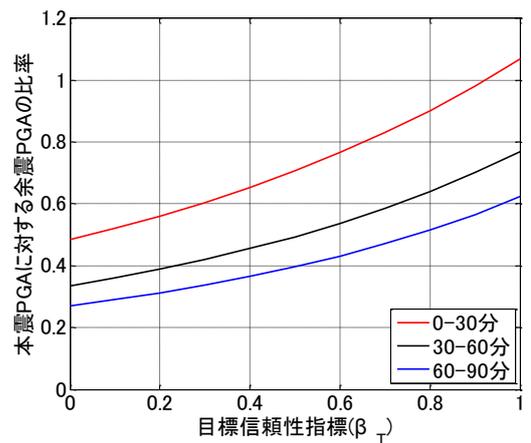
(c) 平均浸水深=12m、平均



(d) 平均浸水深=12m、平均+σ

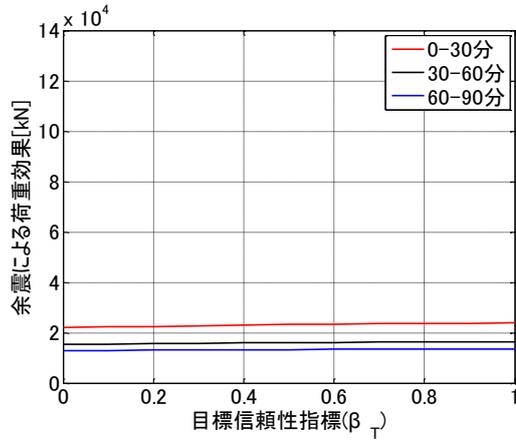


(e) 平均浸水深=6m、平均

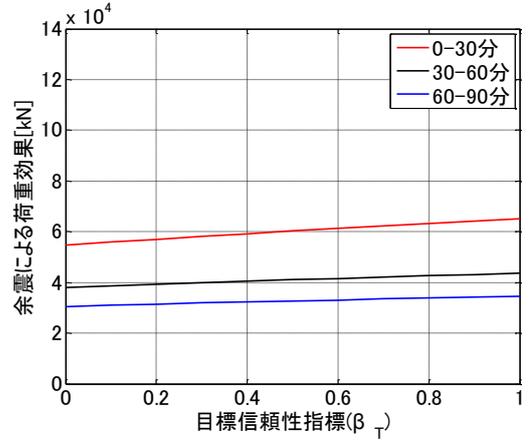


(f) 平均浸水深=6m、平均+σ

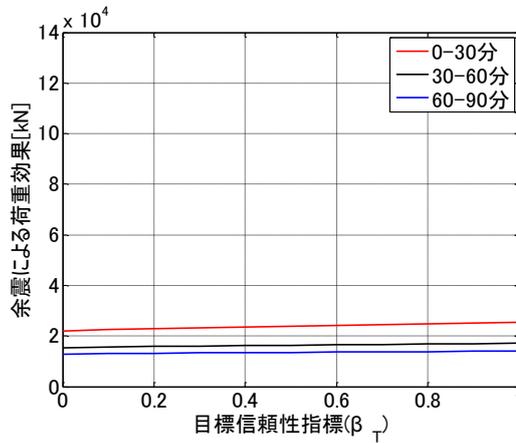
図 5.9 本震 PGA に対する余震 PGA の比率 r



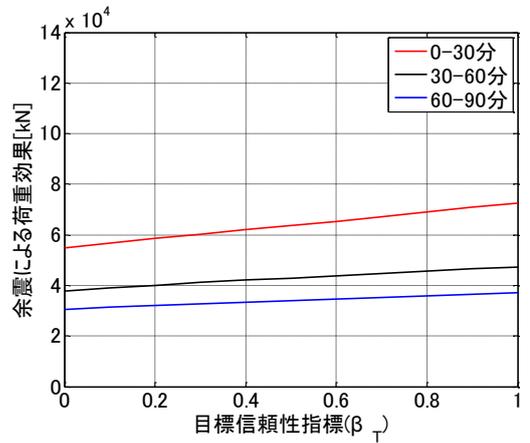
(a) 平均浸水深=18m、平均



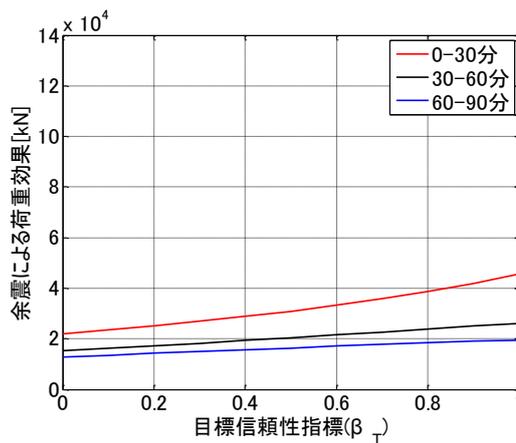
(b) 平均浸水深=18m、平均+σ



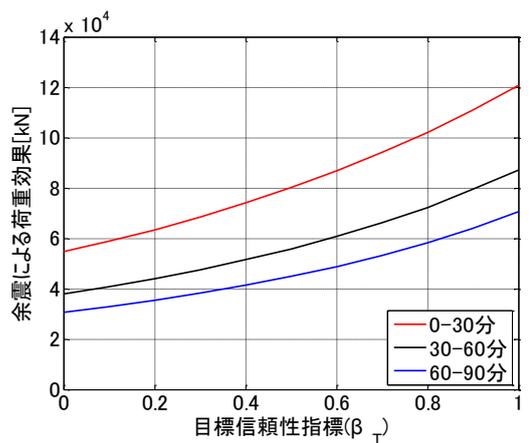
(c) 平均浸水深=12m、平均



(d) 平均浸水深=12m、平均+σ

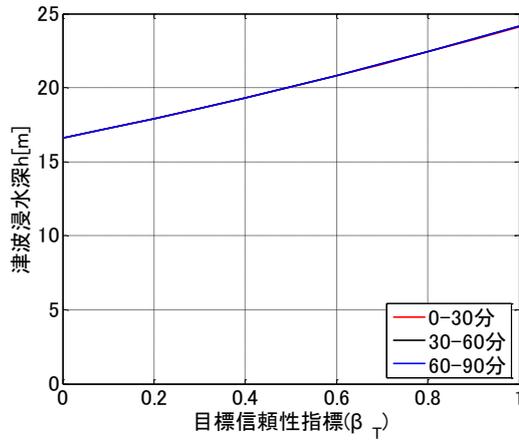


(e) 平均浸水深=6m、平均

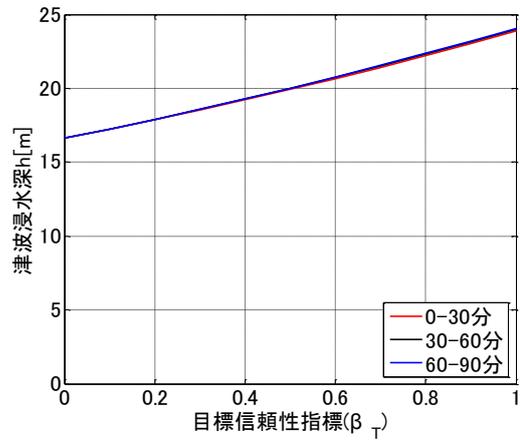


(f) 平均浸水深=6m、平均+σ

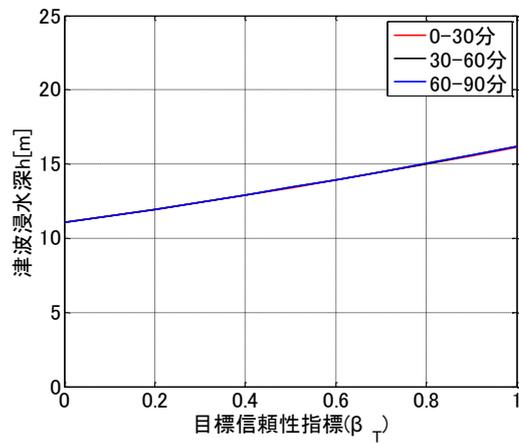
図 5.10 余震による荷重効果[kN]



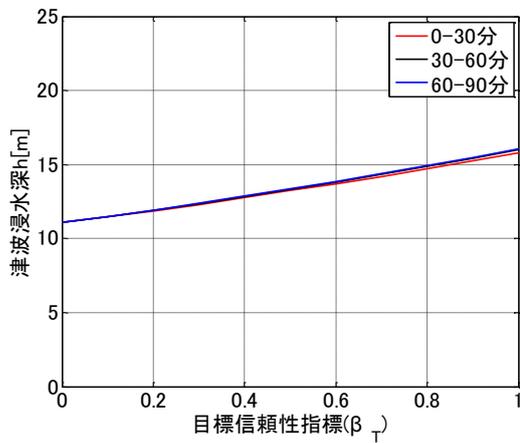
(a) 平均浸水深=18m、平均



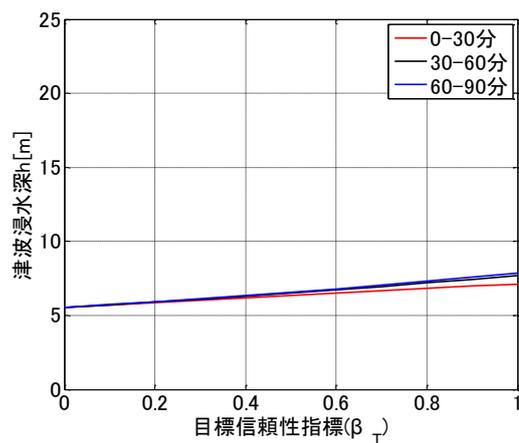
(b) 平均浸水深=18m、平均+σ



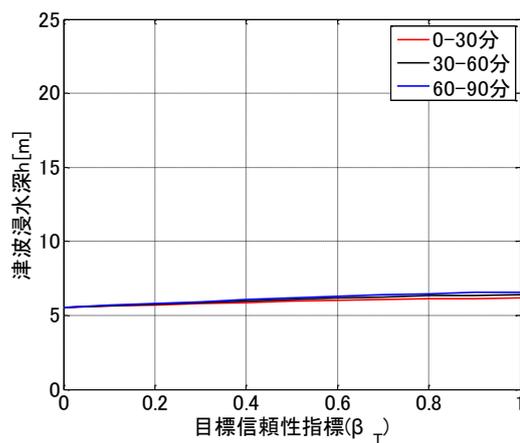
(c) 平均浸水深=12m、平均



(d) 平均浸水深=12m、平均+σ

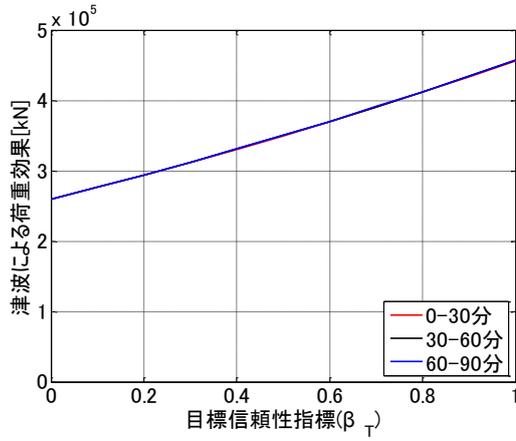


(e) 平均浸水深=6m、平均

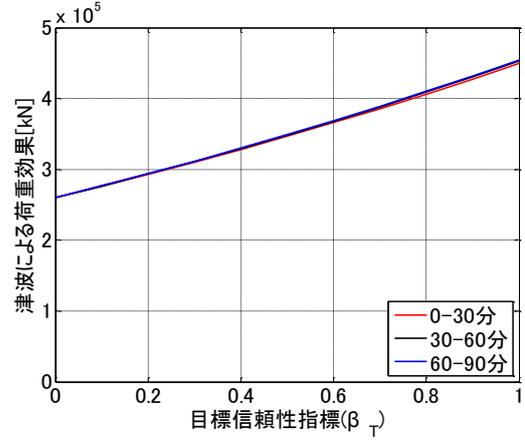


(f) 平均浸水深=6m、平均+σ

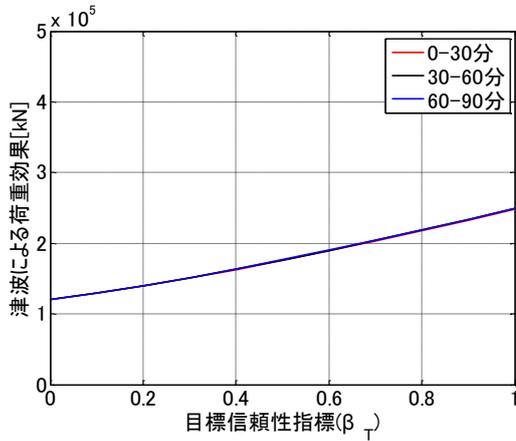
図 5.11 津波浸水深の設計点 [m]



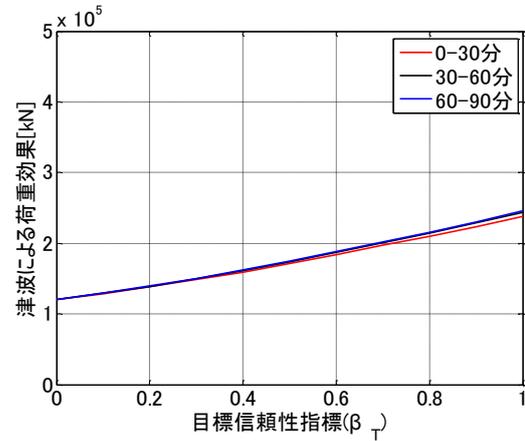
(a) 平均浸水深=18m、平均



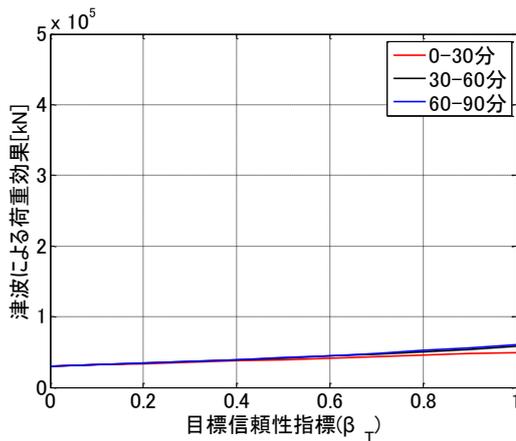
(b) 平均浸水深=18m、平均+σ



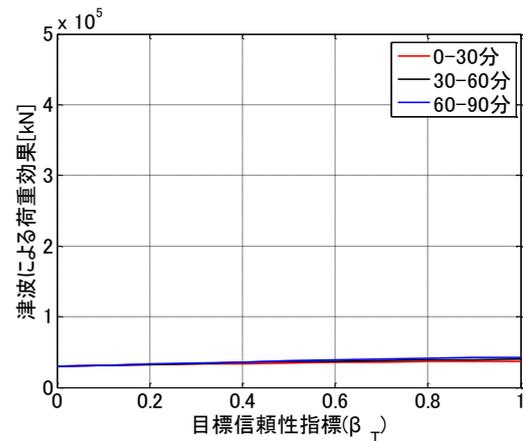
(c) 平均浸水深=12m、平均



(d) 平均浸水深=12m、平均+σ

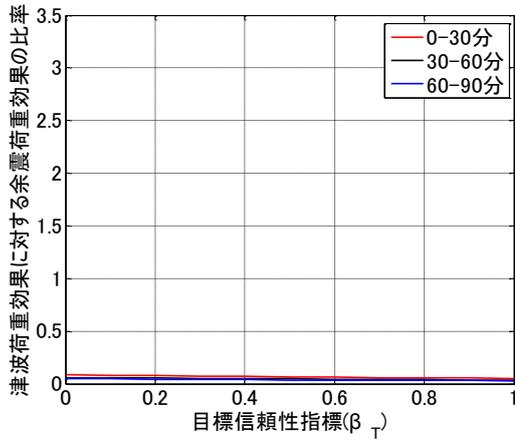


(e) 平均浸水深=6m、平均

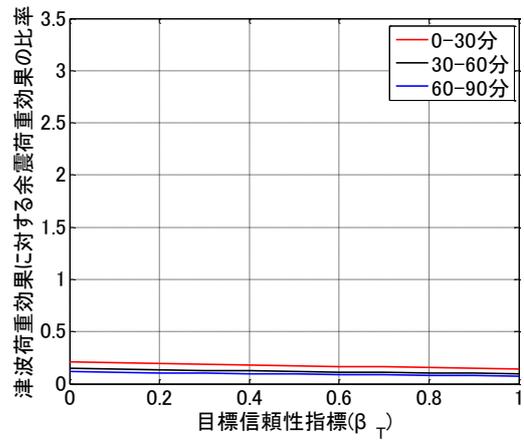


(f) 平均浸水深=6m、平均+σ

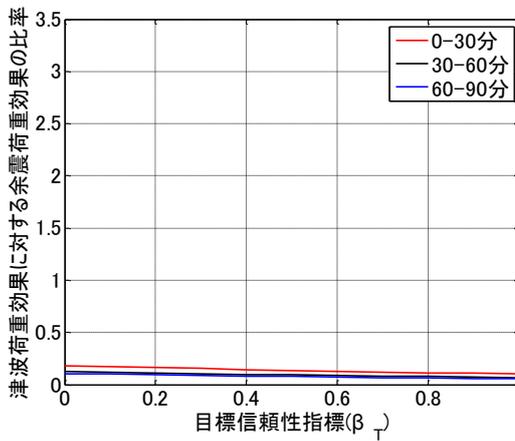
図 5.12 津波による荷重効果[kN]



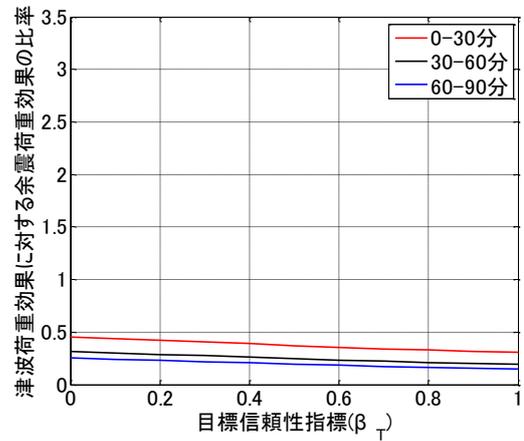
(a) 平均浸水深=18m、平均



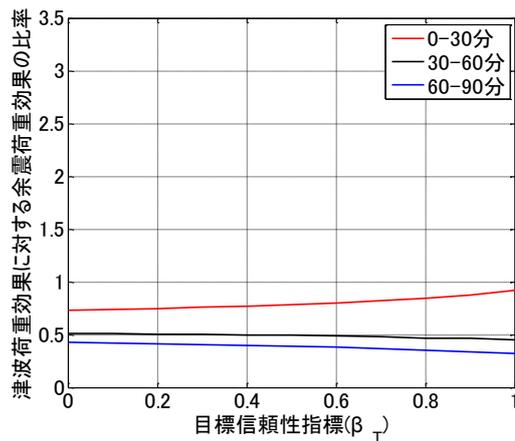
(b) 平均浸水深=18m、平均+ $\sigma$



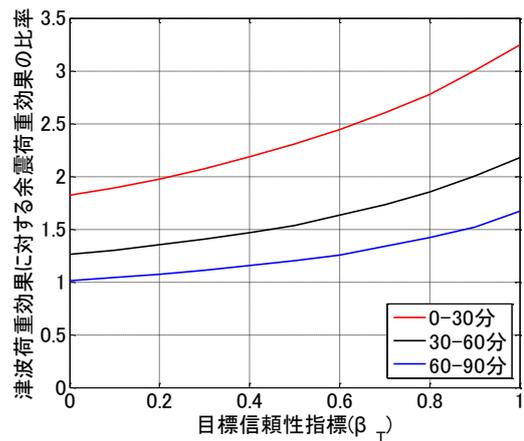
(c) 平均浸水深=12m、平均



(d) 平均浸水深=12m、平均+ $\sigma$

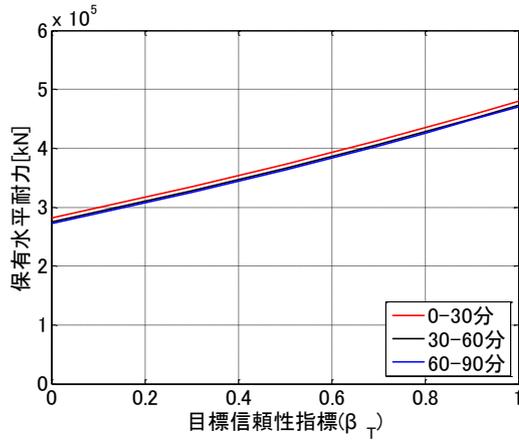


(e) 平均浸水深=6m、平均

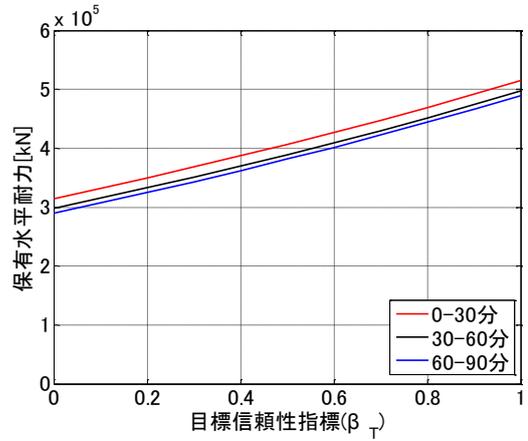


(f) 平均浸水深=6m、平均+ $\sigma$

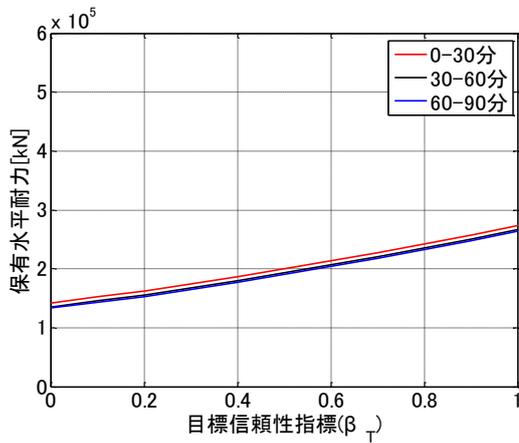
図 5.13 津波荷重効果に対する余震荷重効果の比率



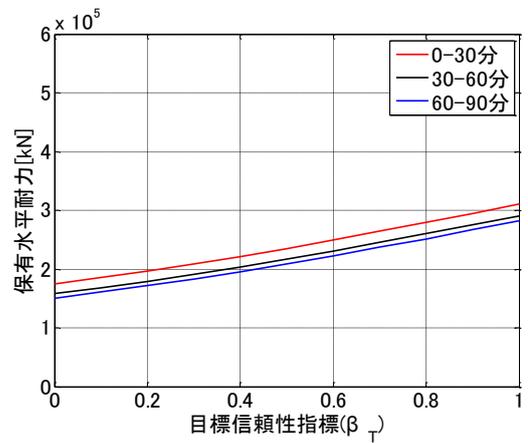
(a) 平均浸水深=18m、平均



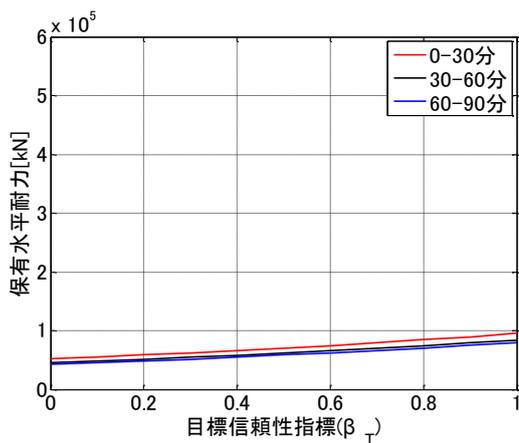
(b) 平均浸水深=18m、平均+σ



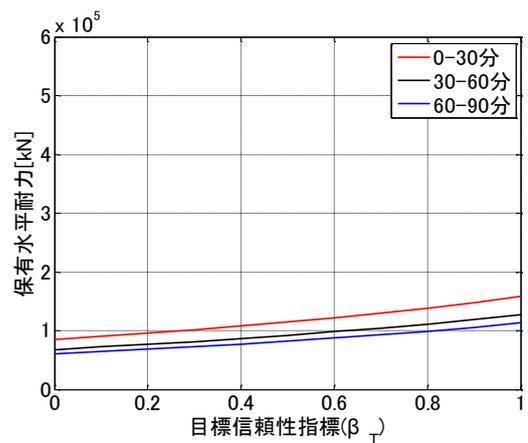
(c) 平均浸水深=12m、平均



(d) 平均浸水深=12m、平均+σ

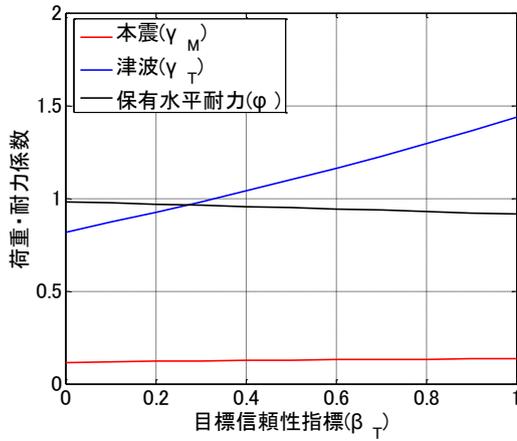


(e) 平均浸水深=6m、平均

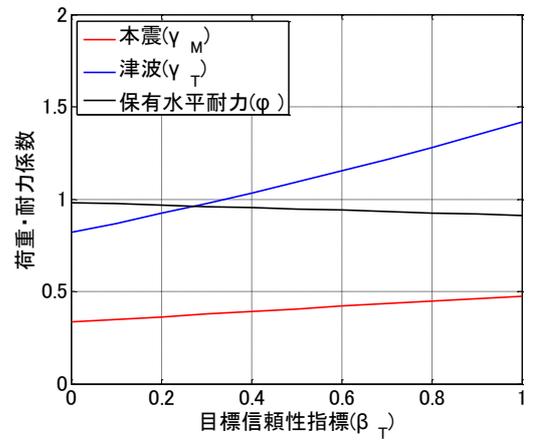


(f) 平均浸水深=6m、平均+σ

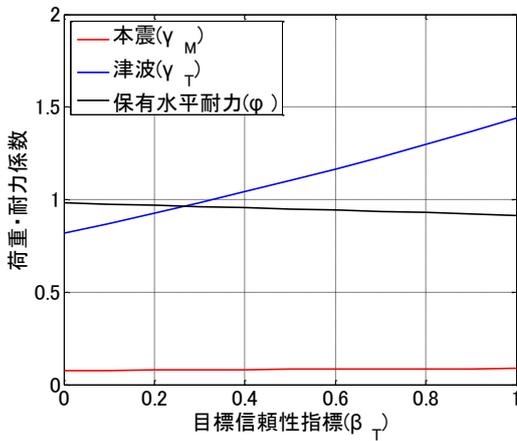
図 5.14 保有水平耐力の設計点 [kN]



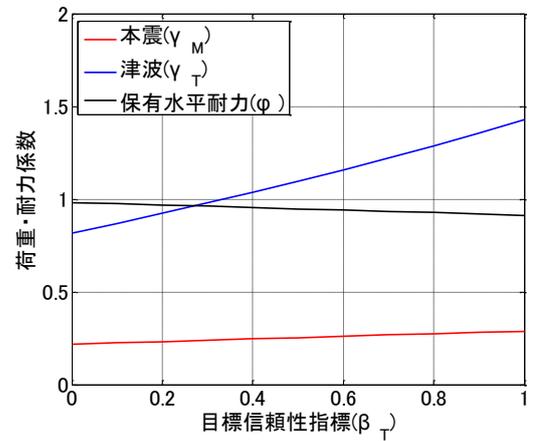
(a) 0-30分、平均



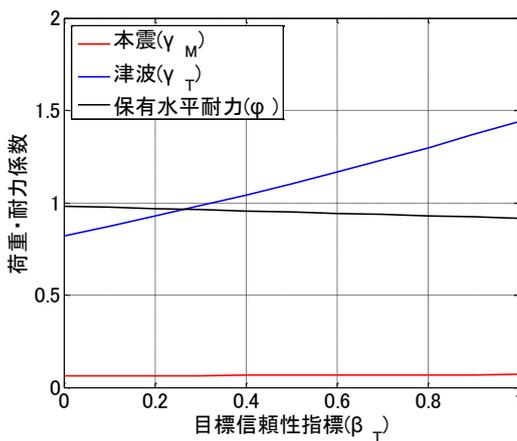
(b) 0-30分、平均+σ



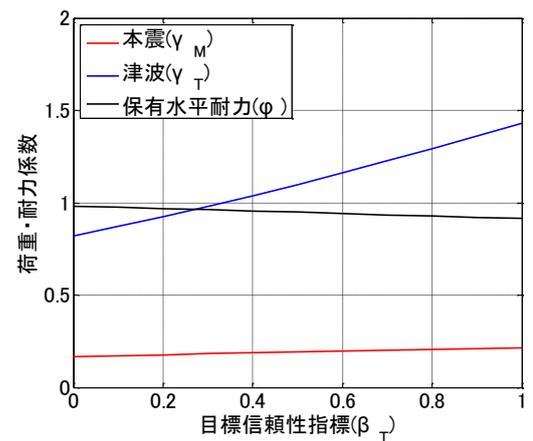
(c) 30-60分、平均



(d) 30-60分、平均+σ

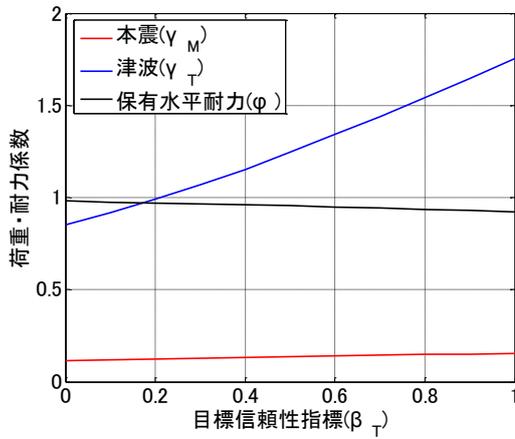


(e) 60-90分、平均

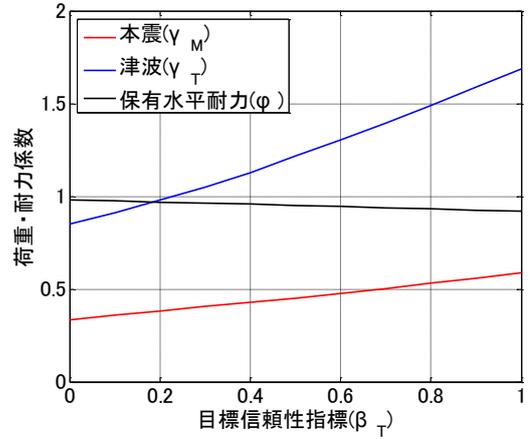


(f) 60-90分、平均+σ

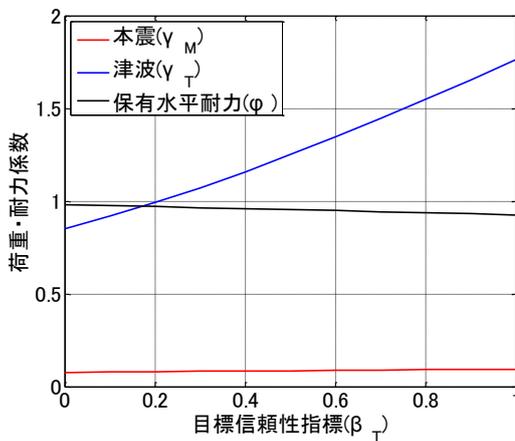
図 5.15 各荷重及び耐力の係数 ( $\mu_n=18m$  の場合)



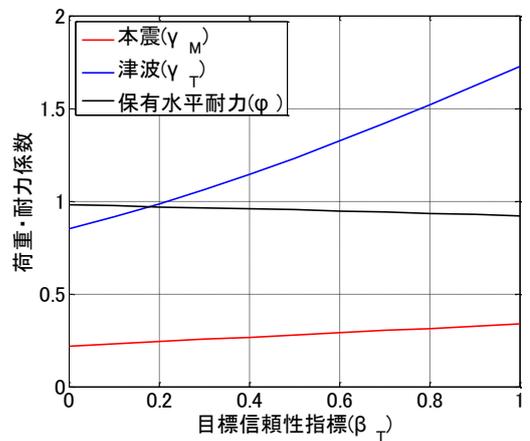
(a) 0-30分、平均



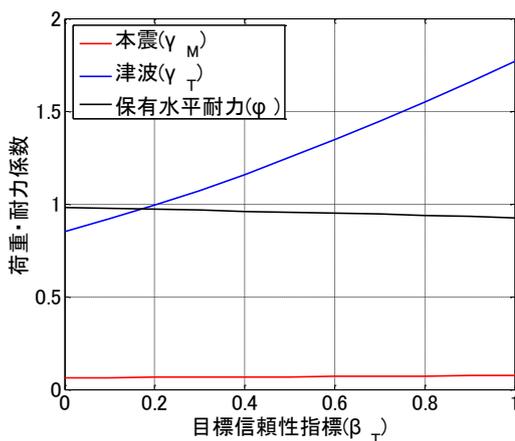
(b) 0-30分、平均+σ



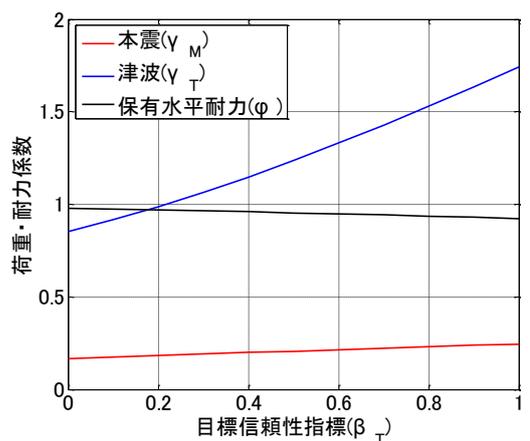
(c) 30-60分、平均



(d) 30-60分、平均+σ

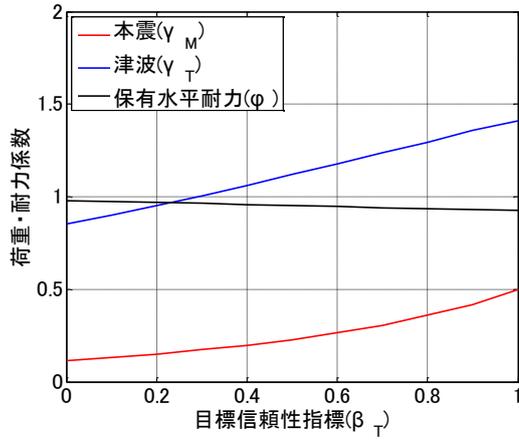


(e) 60-90分、平均

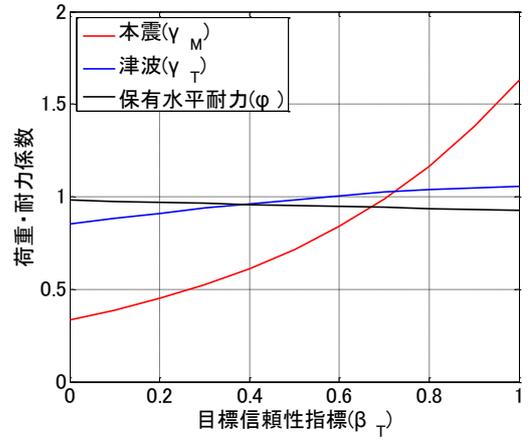


(f) 60-90分、平均+σ

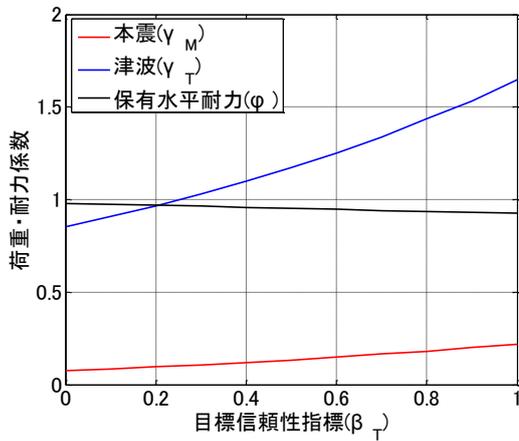
図 5.16 各荷重及び耐力の係数 ( $\mu_n=12m$  の場合)



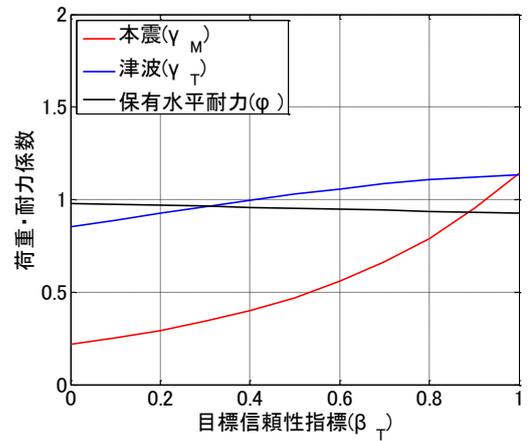
(a) 0-30分、平均



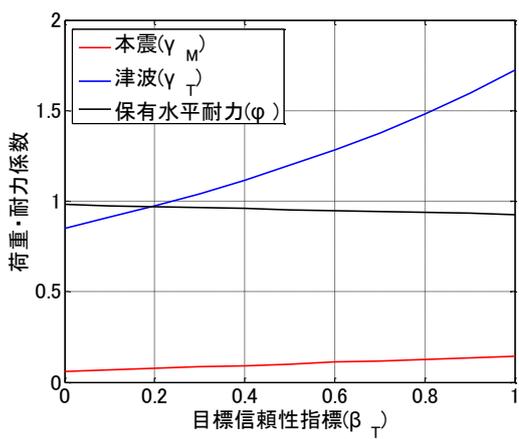
(b) 0-30分、平均+σ



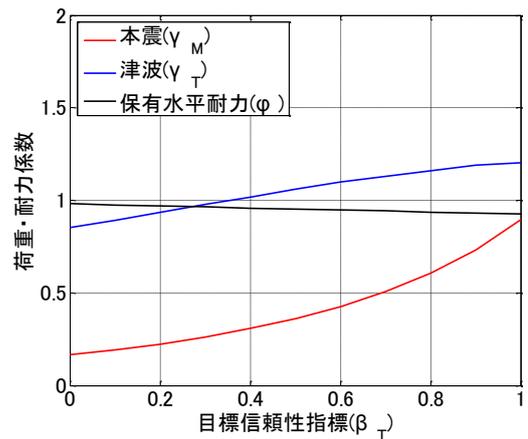
(c) 30-60分、平均



(d) 30-60分、平均+σ



(e) 60-90分、平均



(f) 60-90分、平均+σ

図 5.17 各荷重及び耐力の係数 ( $\mu_h=6m$  の場合)

## 5.4 まとめ

本章では巨大地震後の余震と津波の荷重組み合わせの評価手法について、2011年東北地方太平洋沖地震を適用事例として、限界状態設計法に基づく信頼性解析を行い、荷重及び耐力係数を提案した。

5.2では、余震と津波の荷重組み合わせの信頼性評価を行うための解析条件と荷重のモデル化について説明した。

- ・対象建築物は釜石にあるRC造の10階建ての津波避難ビルと仮定した。
- ・評価期間は岩手南部沖で実際に観測された津波波形を参考に、津波到達時刻( $t_a$ )と津波終了時刻( $t_e$ )でモデル化し、 $t_a$ は0分、30分、60分と、津波継続時間( $t_e - t_a$ )は30分と仮定した。
- ・余震による荷重効果 $Q_A$ は2章及び3章で提案した確率論的余震発生モデルを用いて計算した余震ハザード(PGA)によってモデル化される。なお、余震ハザードの地震間誤差によるばらつきは3.3.3節の手法を用いて評価した。
- ・AFOSMによる評価を行うため、余震ハザードの平均値と標準偏差を求め、同じ平均値と標準偏差を持つ対数正規分布としてモデル化した。
- ・津波による荷重効果 $Q_T$ は阿部式(1989)によって計算された平均津波浸水深 $h=18\text{m}$ と比較のために12m、6mの場合も対数正規分布としてモデル化した。
- ・保有水平耐力 $R$ は変動係数0.2と仮定し、対数正規分布としてモデル化した。
- ・信頼性解析手法としてAFOSMを採用し、目標信頼性指標は0~1.0と仮定した。

5.3では、余震と津波の荷重組み合わせの結果を示し、以下の知見が得られた。

- ・本震PGAと余震PGAの設計点の比較により、本震と比較しても無視できない程度の余震PGAが予測されること、津波による荷重効果に対する余震による荷重効果の比率によって、浸水深6mでは地震間誤差を考慮すると津波より余震による荷重効果が大きくなることが確認された。
- ・余震と津波の荷重組み合わせの結果をまとめて、目標信頼性指標0、0.5、1.0における各荷重及び耐力係数を求め、設計式を提案した。平均浸水深18mの場合、目標信頼性指標0.5の場合の設計式は以下の通りである。

地震間誤差を考慮しない場合： $0.95R_n > 0.13Q_{Mn} + 1.10Q_{Tn}$

地震間誤差を考慮する場合： $0.95R_n > 0.41Q_{Mn} + 1.10Q_{Tn}$

## 5 章の参考文献

- [1] 港湾空港技術研究所、津波は三陸岸で 7 波襲来-釜石沖 GPS 波浪計のデータ回収・分析結果-、<http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110328mlit.html>、2013/11/01 閲覧.
- [2] American Institute of Steel Construction : Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design (LRFD), 1st ed., 1986.
- [3] 日本建築学会 : 建築物荷重指針・同解説、2004.
- [4] 星谷勝、石井清 : 構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986.
- [5] 内閣府、津波避難ビル等に係るガイドラインの巻末資料 2「構造的要件の基本的考え方」、[http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/tsunami\\_siryu2.pdf](http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/tsunami_siryu2.pdf)、2013/11/01 閲覧.
- [6] 阿部勝征 : 地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測、地震研究所彙報、第 64 冊第 1 号、1989.6.30、pp.51-69.
- [7] Isamu AIDA : Reliability of a tsunami source model derived from fault parameters, Journal of Physics of the Earth, VOL.26, NO.1, 1978, pp.57-73.
- [8] 日本建築学会 : 建築物の限界状態設計指針、2002.

# 第6章

## 結論

### 6.1 まとめ

本論文では、海溝型巨大地震後に発生する余震に対して、確率論的余震発生モデル化と余震ハザード評価手法を提案し、その工学的応用として余震ハザードマップの提案及び余震と津波の荷重組み合わせを考慮した耐津波設計への応用を行った。以下に各章で行った内容をまとめる。

第1章「序論」では、2011年東北地方太平洋沖地震の余震被害の事例と余震対策の現状について調査し、余震に対する事前対策の必要性について述べた。特に、中央防災会議による震災対策に余震の影響を考慮していない現状について指摘し、不確定性要素を多く含む余震発生の特徴を考慮し、確率論的余震対策が有効な手段であると述べた。

第2章「確率論的余震発生モデル及びパラメータの提案」では、過去の地震記録を収集と分析を行い、以下のような確率論的余震発生モデル及びそのパラメータを提案した。

$$N(T_1, M_{\min}, M_m) = 10^{a(M_m) + b(T_1)(M_m - M_{\min})} \frac{(T_1 + c)^{1-p} - c^{1-p}}{1-p} \quad (p \neq 1) \quad (6.1)$$

$$\log_{10} N(90, 4.0, M_m) \equiv 0.88M_m - 4.51 \quad (6.2)$$

$$N(T_1, M_{\min}, M_m) = N(90, 4.0, M_m) \frac{(T_1 + c)^{1-p} - c^{1-p}}{(90 + c)^{1-p} - c^{1-p}} \quad (p \neq 1) \quad (6.3)$$

$$\bar{b}(90) = 0.83, \sigma_{b(90)} = 0.12 \quad (6.4)$$

$$\bar{p} = 1.05, \sigma_p = 0.17 \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} M_m &= M_{\max} + D_1 \\ \bar{D}_1 &= 1.0, \sigma_{D_1} = 0.5 \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$b(T_1) = 0.068 \log_{10}(T_1) + 0.70 \quad (6.7)$$

$$A_{after} = 10^{0.778M_m - 1.60} \quad (6.8)$$

第3章「提案モデルの余震ハザード評価への適用」では、第2章で提案した確率論的余震発生モデルを既往の地震ハザード評価式に適用し、各パラメータの地震間誤差による感度解析を行った。また2011年東北地方太平洋沖地震の余震ハザード評価を行い、実測値と比較することで提案モデルの適用性を確認した。その結果、提案手法による余震ハザード結果は実測値とある程度一致することを示した。ただし、平均値からのずれも確認されたため、パラメータの地震間誤差、余震発生の平面及び深さ分布のばらつき、地震タイプについても考慮して評価する必要があることが分かった。なお、将来発生することが予測される関東地震及び東海東南海連動型地震に提案手法を適用して、その余震を評価し、本震の地震動を超えるような余震が発生する可能性が十分あることが確認できた。

第4章「余震ハザードマップの提案と応用例」では、余震ハザードマップを作成する手法を提案しその活用法について考察した。適用事例として、本震マグニチュード7.9と8.2の関東地震を対象に首都圏における本震PGVを超える余震数に関するハザードマップの作成手法を提案した。また、本震マグニチュード7.9の関東地震を対象に評価期間を変化させて評価を行い、余震ハザード結果における評価期間の影響を評価した。なお、ハザードマップの応用について考察を行い、復旧活動における余震ハザードマップの活用法について述べた。

第5章「耐津波設計における余震と津波の荷重組み合わせの提案」では、海溝型

巨大地震直後の余震と津波の荷重組み合わせの合理的な評価手法を提案することを目的とし、東北地方太平洋沖地震を対象に限界状態設計法に基づく信頼性解析を行い、耐津波設計における合理的な余震と津波の荷重組み合わせ評価手法を提案した。平均浸水深 18m の場合、目標信頼性指標 0.5 の場合の設計式は以下の通りである。

$$\text{地震間誤差を考慮しない場合： } 0.95R_n > 0.11Q_{Mn} + 1.10Q_{Tn}$$

$$\text{地震間誤差を考慮する場合： } 0.95R_n > 0.39Q_{Mn} + 1.10Q_{Tn}$$

## 6.2 今後の課題

今後の課題を以下に挙げる。

まず、確率論的余震発生モデルに関連して以下の課題がある。

- 本震断層面から飛び離れて発生する誘発地震については、対象範囲外としたが、誘発地震までを考慮した余震発生モデルを提案する必要がある。
- 本研究で使用した余震記録は、震源観測システムが構築された 1923 年以降に得られた気象庁の地震記録が元になっている。そのため、提案した確率論的余震発生モデルのパラメータは、今後発生する海溝型巨大地震の余震記録を反映して改善する必要がある。
- 本震発生位置による地域差を考慮するため、本震発生位置による空間的余震発生の特徴についても分析する必要がある。
- 拡大断層面上で一様に余震が発生すると仮定したが、実際には拡大断層面の上下にばらついて分布する。特に規模の大きい余震が拡大断層面より浅いところで発生する場合、その影響は大きくなるので、余震発生の深さ方向の余震発生を分析し、深さ方向のばらつきを考慮したモデルにする必要がある。
- 余震の地震タイプを一概にプレート間地震と仮定したが、余震震源深さの考慮とともに余震の地震タイプも考慮する必要がある。
- 改良大森式における本震発生直後の複雑な様相を補正する定数  $c$  について、本研究では簡便さのため、 $c=0.1$  と確定値として扱ったが、地震毎に異なり、不確定値とする必要がある。特に、5 章の余震と津波の荷重組み合わせにおいては、本震発生から時間単位のモデル化を行うため、 $c$  値の適切なモデル化が必要である。

次に、余震ハザード評価に関しては、以下の課題がある。

- ・本震発生直後の復旧活動を想定して、本研究では主に本震 PGV を超える余震に関する評価を行ったが、その他にも使用目的の考慮の上、より具体的な評価基準を提案する必要がある。
- ・本震発生から数時間程度の余震ハザードにおける誤差について過去の余震を対象に分析を行い、改善する必要がある。

余震と津波の荷重組み合わせ評価手法に関しては、以下の課題がある。

- ・対象津波を本震によって発生する津波と限定しているが、巨大な余震によっても津波発生が考えられるため、余震による津波も考慮する必要がある。
- ・津波継続期間を津波到達から 30 分間と仮定しているが、本震マグニチュードと津波継続期間の関係の分析によってより詳細にモデル化する必要がある。
- ・津波継続期間の間に津波浸水深を一定と仮定しているが、これにも改善の余地があると考えられる。
- ・浮力効果について考慮していないが、津波浸水深が高くなると浮力の影響も無視できなくなると思うので考慮する必要がある。
- ・余震ハザードをモデル化する際、地震間誤差によるばらつきを一つの条件として考えているが、このばらつきまでを余震ハザードモデルに取り込んだ荷重耐力係数評価にする必要がある。
- ・余震と津波による荷重効果が建築物の 1 階の保有水平耐力を超えて破壊されることだけを考えているが、津波による破壊モードについて分析し、より多様な破壊モードに対応できるような手法を提案する必要がある。

本研究の将来の展望として以下の点があげられる。

- ・巨大地震が発生した状況に応じて、風荷重や雪荷重等によるより複雑なマルチハザード評価に提案余震ハザード手法を活用することが可能である。
- ・余震による停電、断水、鉄道の運休などの被害予測を行い、より具体的な余震防災対策への応用が期待される。

### A. 既知の $b(T_1)$ 、 $M_m$ 、 $D_1$ による総余震数 $N$ の推定法

過去の余震記録を GR 式と MO に適用して得られたパラメータを示した表 2.3 では既往の研究によって計算されたパラメータも含まれている。その中で総余震数  $N$  は最小マグニチュード  $M_{\min}$  が本研究における値である 4.0 と一致しなかったため、利用することが出来なかった。しかし、既往の研究によって  $b$  値、本震マグニチュード  $M_m$ 、 $D_1$  値は与えられているため、(A.1)式のように表すことが出来、展開すると(A.2)のように総余震数  $\log_{10}N(T_1, M_{\min}, M_m)$  を推定することが出来る。

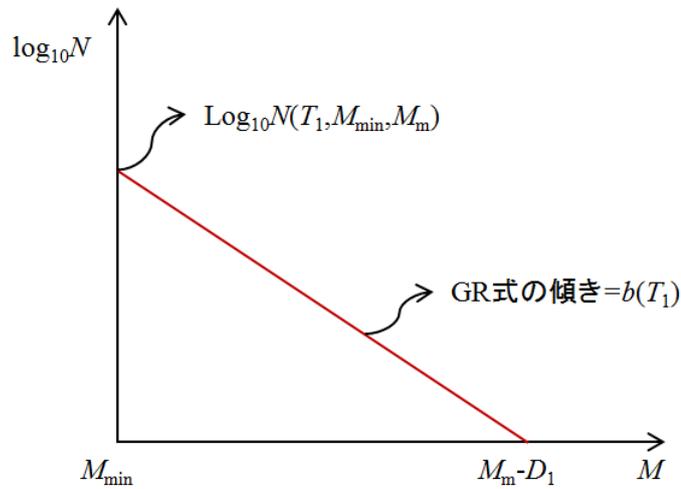


図 A.1 既知の  $b(T_1)$ 、 $M_m$ 、 $D_1$  によって  $\log_{10}N(T_1, M_{\min}, M_m)$  を求める手法

$$\frac{\log_{10} N(T_1, M_{\min}, M_m) - \log_{10}(1)}{M_{\min} - (M_m - D_1)} = -b \quad (\text{A.1})$$

$$\log_{10} N(T_1, M_{\min}, M_m) = b(M_m - D_1 - M_{\min}) \quad (\text{A.2})$$

この手法から  $M_{\min}=4.0$ 、 $T_1=90$ [日]の総余震数  $N(90, 4.0, M_m)$  を推定して、表 2.5 に赤

字で追加したものを表 A.1 に示し、本研究の提案モデルとの対応関係を確認するため、図 2.14 に推定結果を□で追加した結果を図 A.2 に示す。図 A.2 によると、推定された  $N(T_1, M_{\min}, M_m)$  は提案したモデルとある程度対応していることが確認出来る。

表 A.1 過去の本震の余震発生パラメータ ( $T_1=90, M_{\min}=4.0$ )

$M_m$	本震日付 (GMT)	本震震源		余震発生パラメータ				参 考
		経度	緯度	$N$	$b(90)$	$p$	$D_1$	
9.0	20110311	142.9	38.1	3123	0.99	0.86	1.3	
7.0	20080507	141.6	36.2	27	0.91	0.84	1.2	
8.0	20030925	144.1	41.8	212	0.84	1.02	0.9	
7.3	19951203	150.1	44.6	329	0.89	0.97	0.3	
7.2	19950106	142.3	40.2	26	0.7	0.76	1.0	
7.6	19941228	143.7	40.4	191	0.8	0.93	1.1	
6.9	19920718	143.4	39.4	100	0.8	1.09	0.5	
7.1	19891101	143.1	39.9	34	0.74	0.94	0.8	
6.7	19870206	141.9	36.9	26	0.88	0.91	1.1	
7.1	19840806	132.2	32.4	7	1.03	1.00	2.3	
7.0	19820723	142.0	36.2	49	0.83	0.98	0.8	
7.4	19780612	142.2	38.2	30	0.69	0.86	1.1	
7.9	19680516	143.6	40.7	1413	0.90	1.00	0.4	
7.5	19640616	139.2	38.4	126	1.00	1.40	1.4	
7.0	19610226	131.9	31.6	9	0.75	1.00	1.7	
6.8	19610112	142.3	36.0	120	0.80	1.30	0.2	
7.5	19600320	143.5	39.8	197	0.85	1.30	0.8	
8.1	19520304	143.9	42.2	251	0.80	1.10	1.1	
8.1	19461220	135.6	33.0	174	0.70	1.00	0.9	
8.0	19441207	136.2	33.7	78	0.70	1.10	1.3	
7.7	19381105	141.6	37.1	219	0.65	1.20	0.1	
7.1	19380523	141.4	36.7	33	0.80	1.10	1.2	
8.3	19330302	144.7	39.1	933	1.10	1.40	1.6	

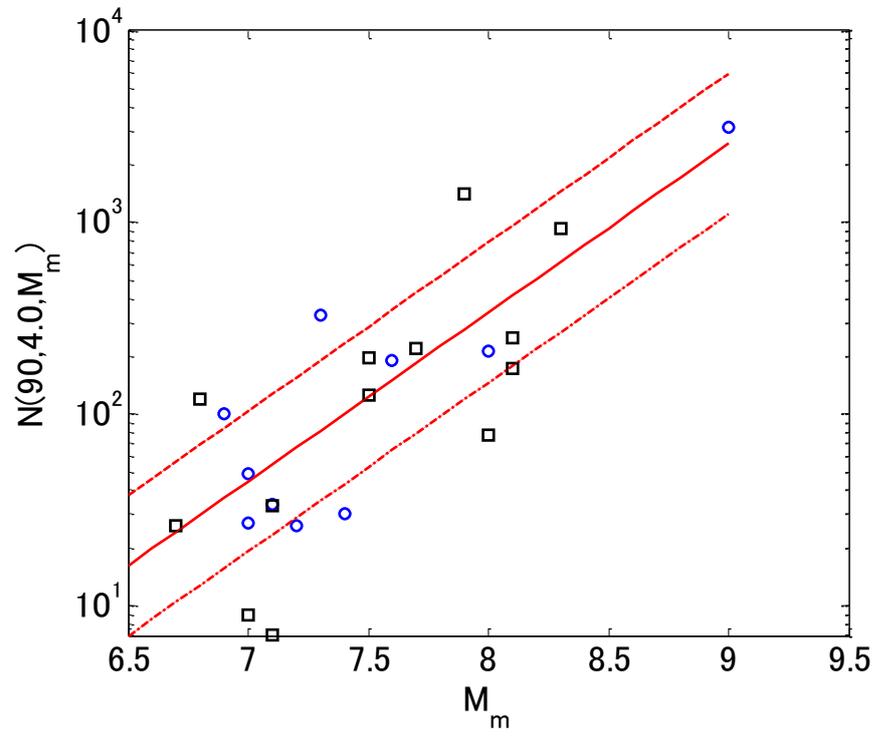


図 A.2 総余震数  $N(90, 4.0, M_m)$  と本震マグニチュード  $M_m$  の関係

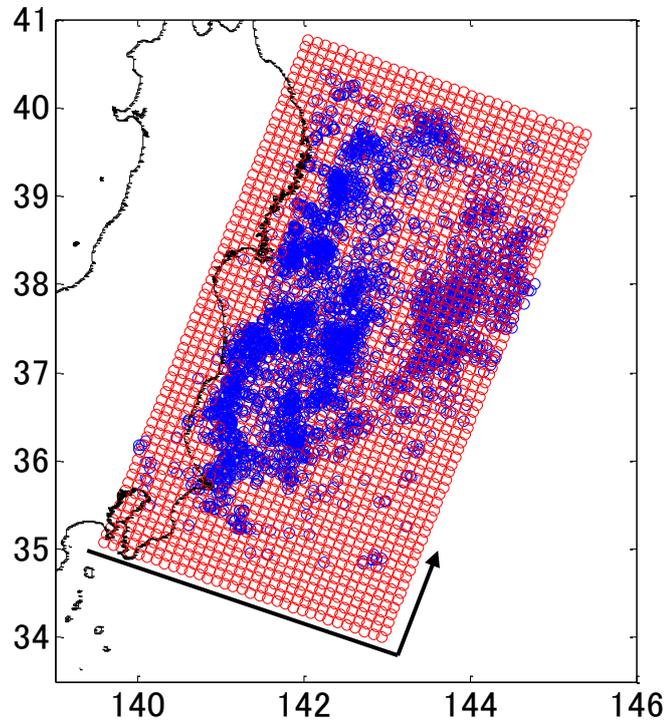
## B. 拡大断層面と実際の余震震源との比較

本研究では余震ハザード評価の際に、余震発生は本震断層面を広げた拡大断層面という平面上で一様に分布すると仮定している。しかし、実際の余震は拡大断層面の上下にある程度幅を持って分布する。そこで、本研究の拡大断層面から実際の余震記録の震源までの最短深さを調査し、拡大断層面との位置関係を確認する。

まず、対象地震は東北地方太平洋沖地震の余震とし、本震発生から 90 日間に発生した M4.0 以上の震源深さ 100km 以浅の 3123 個の余震とする。その平面分布と深さ分布を図 B.1 に示す。青い丸が余震の震源分布、赤い丸が拡大断層面のメッシュの位置を意味する。図 B.1(b)の深さ分布によると、実際の余震の震源位置が拡大断層面上下に分布していることが確認出来る。それぞれの余震震源から拡大断層面までの最短鉛直深さを計算すると、平均値が-3.7km、標準偏差が 24.7km であり、この結果による確率密度関数を図 B.2 に示す。ここで、余震震源位置が拡大断層面より浅い場合の深さをプラス、拡大断層面より深い場合の深さをマイナスと仮定した。

この結果によると、余震震源から拡大断層面までの深さのばらつきが無視できない程度であり、この結果は本文の 3.3.4 節における余震ハザードと観測値とのずれの原因の一つであると考えられる。確率論的余震発生モデルの精度を高めるためには、拡大断層面上で余震が発生するという本研究の仮定に、拡大断層面の深さ方向へのばらつきを適切に考慮する必要があると考えられ、今後の課題とする。

(a) 平面分布



(b) 深さ分布

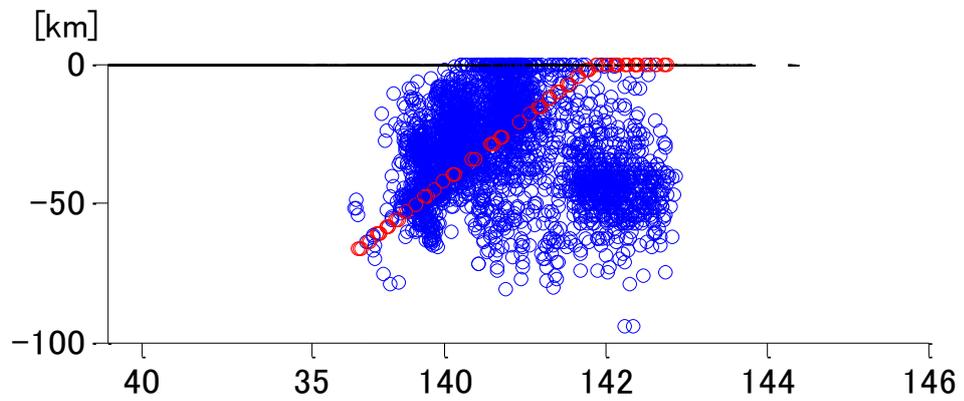


図 B.1 東北地方太平洋沖地震の余震震源と拡大断層面の位置関係

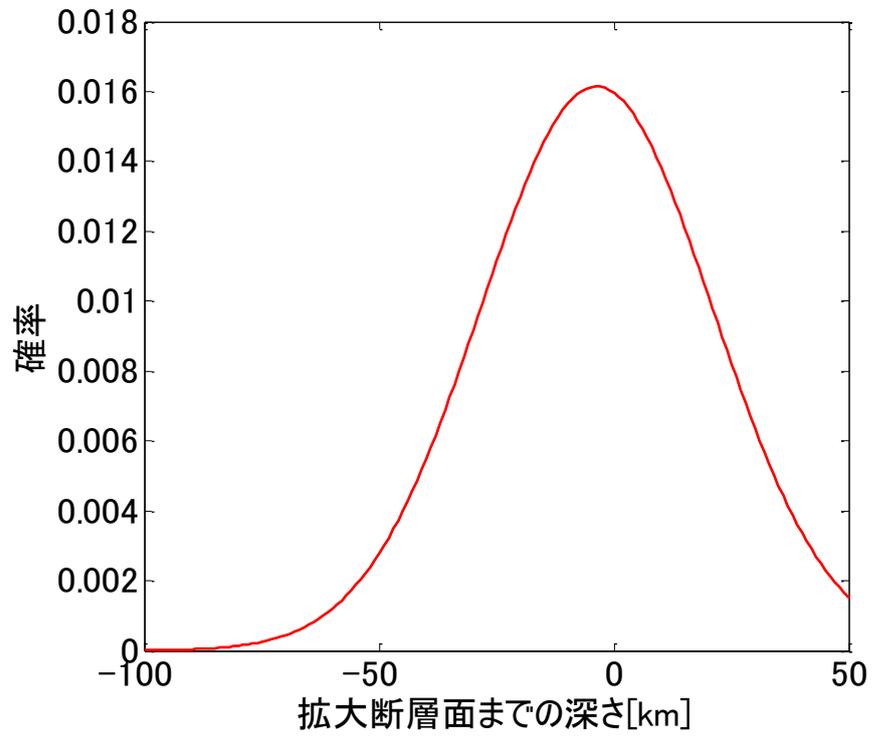


図 B.2 東北地方太平洋沖地震の余震震源から拡大断層面までの最短深さ分布  
(90 日間、M4.0 以上)

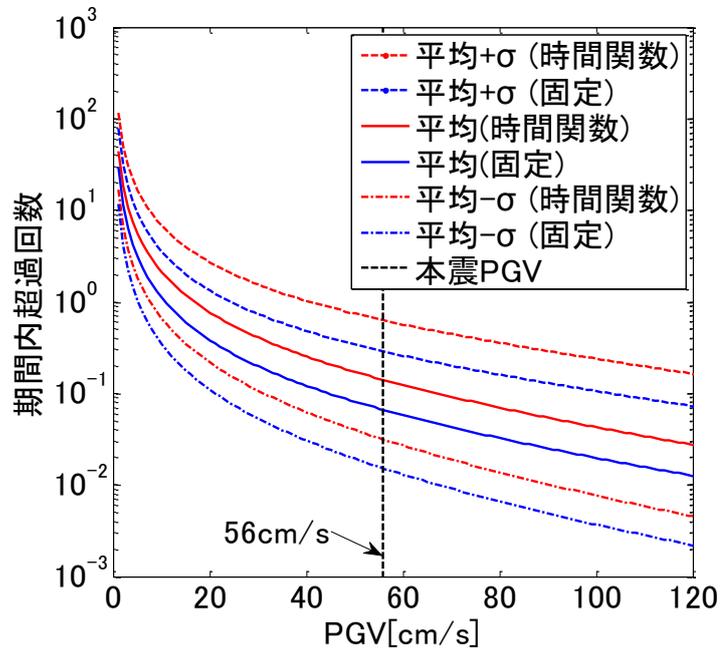
### C. 時間関数 $b$ 値による余震ハザードへの影響

本研究では過去の余震記録の分析から確率論的余震発生モデルの  $b$  値が本震発生からの時間経過によって大きくなることを確認し、 $b$  値を時間の関数としてモデル化した。このようにすることで、本震発生直後では  $b$  値が小さく、規模の大きい余震の割合が大きく、時間の経過と共に  $b$  値が大きくなり、規模の小さい余震の割合が大きくなっていく現象が表現出来ると考えられる。そこで、この現象が余震ハザードに与える影響を確認するため、 $b$  値を 90 日間の平均値として固定した場合と、時間関数にした場合に対し、本震発生から 3 日間の応急活動期と本震発生から 180 日の期間において比較分析を行い、その結果を図 C.1 に示す。

まず、3 日間の結果では  $b$  値を時間関数にした余震ハザード結果の方が大きいことが分かる。これは、 $b$  値を時間関数にすると本震後 3 日間の  $b$  値は 90 日間の固定値である 0.83 より小さくなり、つまり大きい余震の割合が大きくなり、固定値にした余震ハザードの結果より大きくなった。一方、本震発生から 180 日間の場合は、 $b$  値を時間関数とした方が  $b$  値を 0.83 に固定した方より小さい余震ハザードになっていることが確認出来る。これは  $b$  値を時間関数にすることで 180 日の  $b$  値は 0.83 より大きくなり、つまり大きい余震の割合が小さくなることが反映され、 $b$  値を 0.83 に固定した余震ハザードより小さくなると考えられる。

この結果から、 $b$  値を時間関数とすることで、本震発生直後においては大きめの評価が、本震発生からある程度時間が経過した後においては小さめの評価となることが確認できた。

(a) 3 日間



(b) 180 日間

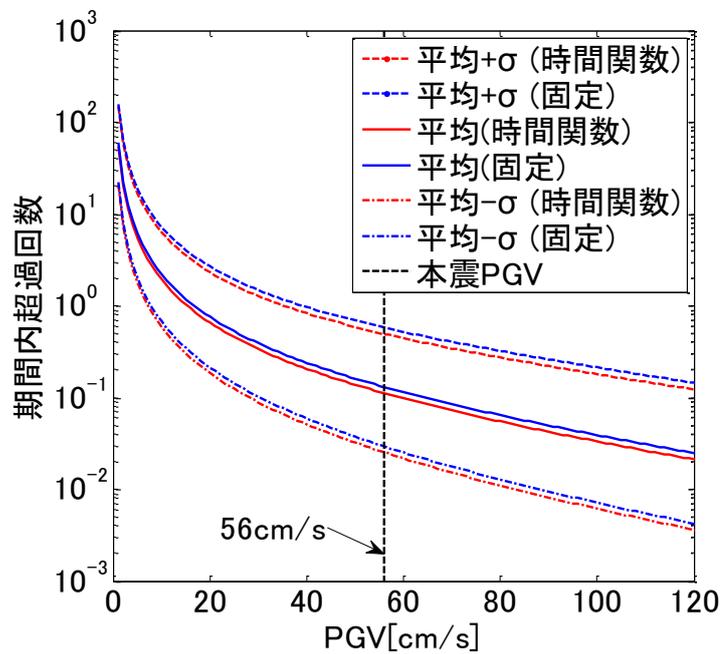


図 C.1 時間関数  $b$  値の余震ハザードへの影響 (@石巻)

## D. 震度 5 弱を超える余震数に関する余震ハザードマップ

4.2.3 節では本震 PGV を超える余震数に関する余震ハザードマップを提案した。本震 PGV という基準は、本震の地震動によって損傷を受けた建築物にその後さらに本震規模の余震による建物の崩壊などの被害を受けることを想定し、救助活動やライフラインの復旧活動開始や避難区域設定などの意思決定を行うための基礎資料として意義がある。しかし、各評価サイトの本震 PGV 値が異なるため、余震ハザード結果を評価するためには注意が必要である。

そこで、全ての評価サイトに対して同一の基準値によって余震ハザード評価を行い、その余震ハザードマップを作成することも可能である。ここでは、その一例として、ライフラインやインフラ等への影響が出始める震度 5 弱を基準値とし、これを超える余震数に関する余震ハザードマップを提案する。

本震マグニチュード、拡大断層面、評価サイト等の余震ハザード評価に関する解析条件は 4.2.3 節と同様であるが、評価基準だけが本震 PGV から震度 5 弱に変えたものである。まず、防災科学技術研究所の強震観測網のボーリングデータから計算した各サイトにおける PGV の地盤増幅率を図 D.1 に示す。K-NET SIT003(久喜)と KNG013(小田原)ではボーリングデータによって計算された AVS30 が特に小さく、その結果、地盤増幅率が大きくなっている。この地盤増幅率を考慮した余震ハザード計算を行い、震度 5 弱に相当する計測震度 4.8 の PGV の中央値である 15cm/s を超える余震数に関する余震ハザードマップを応急活動期及び復旧活動期に対してそれぞれ作成し、図 D.2、D.3 に示す。

4.2.3 節の本震 PGV を超える余震数に関する余震ハザードマップでは本震断層面からの距離と拡大断層面の深さに大きい影響を受けたのに対し、震度 5 弱を超える余震数に関する余震ハザードマップでは地盤増幅率と拡大断層面までの距離に大きく影響を受けていることが分かる。その結果、本震 PGV を基準とした余震ハザードマップでは本震断層面から離れた拡大断層面の浅いところで余震ハザードが大きか

ったのに対し、震度 5 弱を基準とした余震ハザードマップでは拡大断層面内の地盤増幅率が大きいサイトで余震ハザードが大きくなっている。久喜(K-NET SIT003)の地盤増幅率は大きいですが、拡大断層面の外側に位置しているため 15cm/s を超える余震数は少なく、一方小田原(K-NET KNG013)の地盤増幅率は久喜より小さいが、拡大断層面内に位置しているためハザード結果が大きくなっている。

応急活動期における震度 5 弱を超える最大余震数は  $M_m=8.2$  の平均+ $\sigma$  で約 4 回、復旧活動期では  $M_m=8.2$  の平均+ $\sigma$  で約 0.55 回であり、救助活動やライフラインの復旧活動や避難区域設定などの復旧活動計画のための目安として活用することができると考えられる。

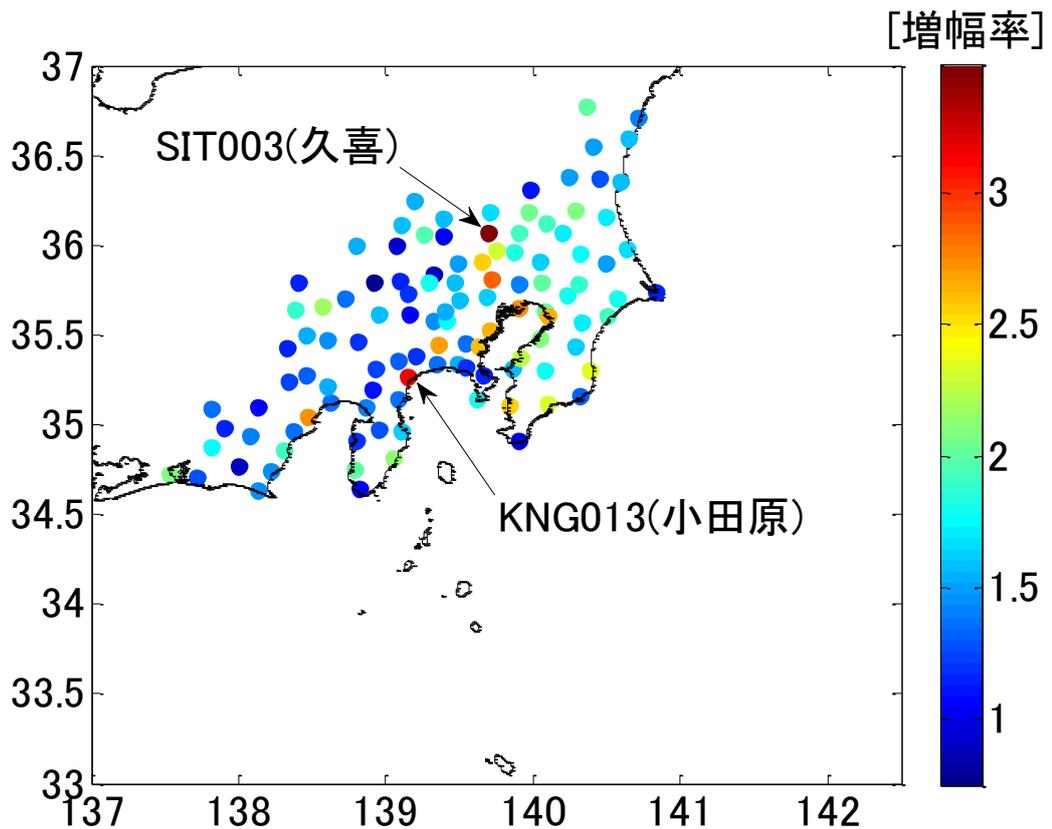
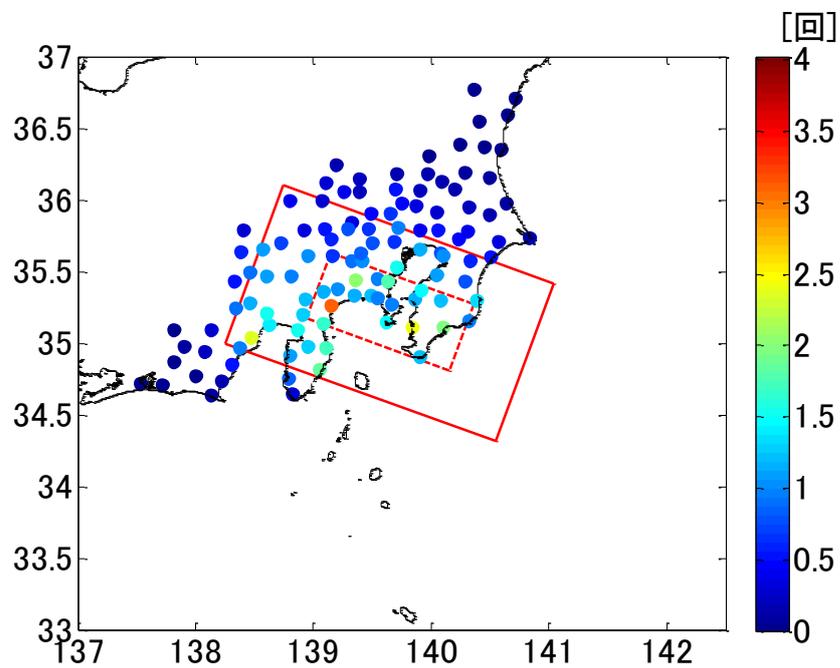
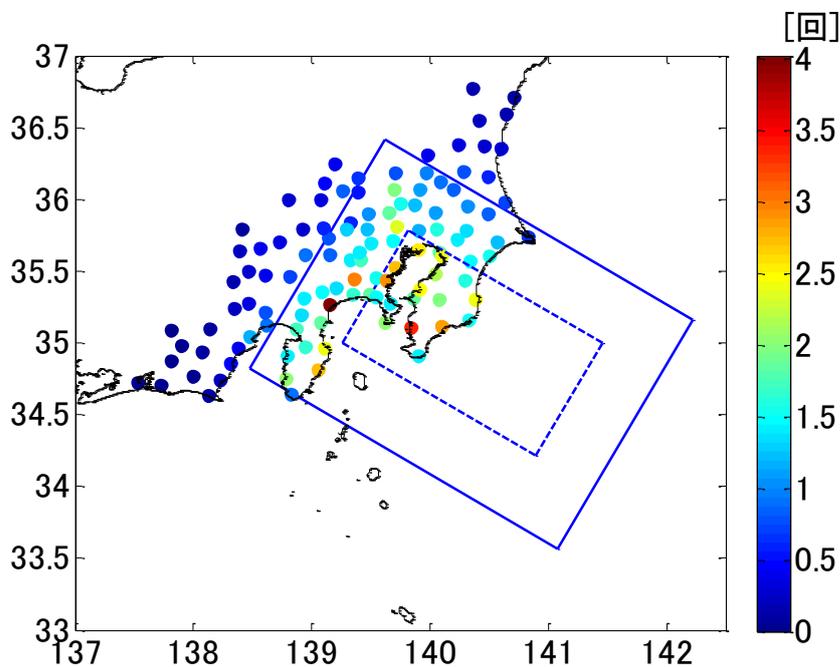


図 D.1 工学的基盤から地表面までの PGV の増幅率

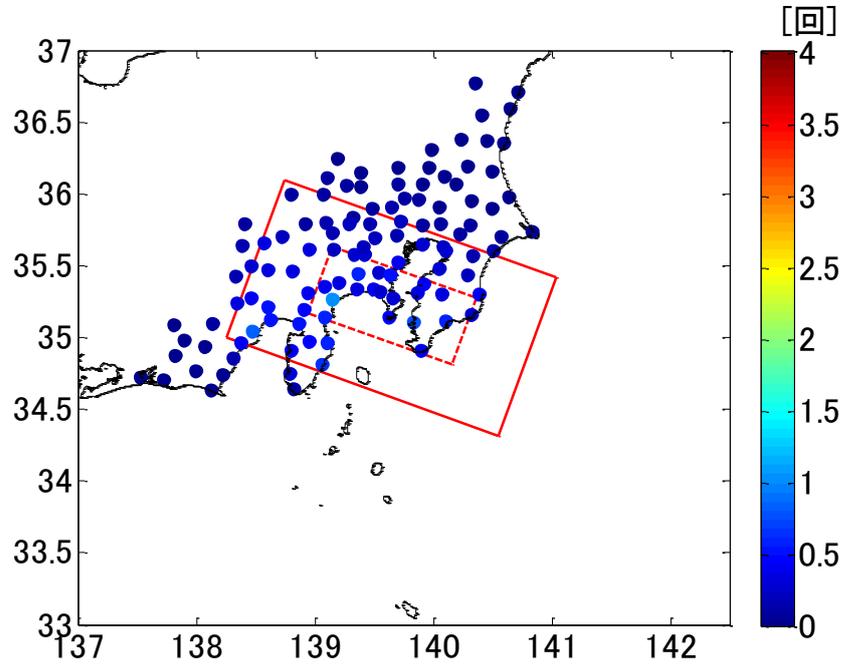
(a)  $M_m=7.9$ , 平均 $+\sigma$



(b)  $M_m=8.2$ , 平均 $+\sigma$



(c)  $M_m=7.9$ , 平均



(d)  $M_m=8.2$ , 平均

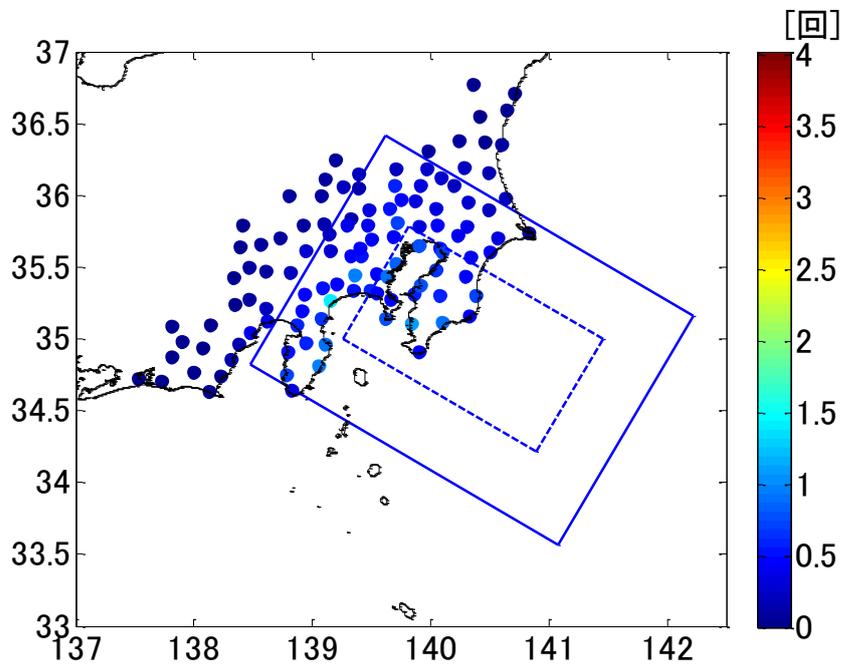
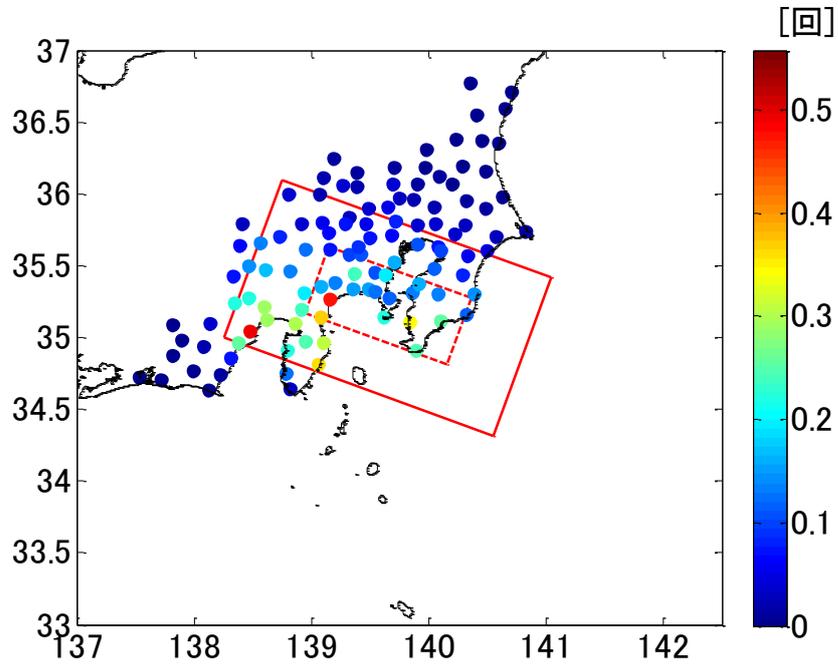
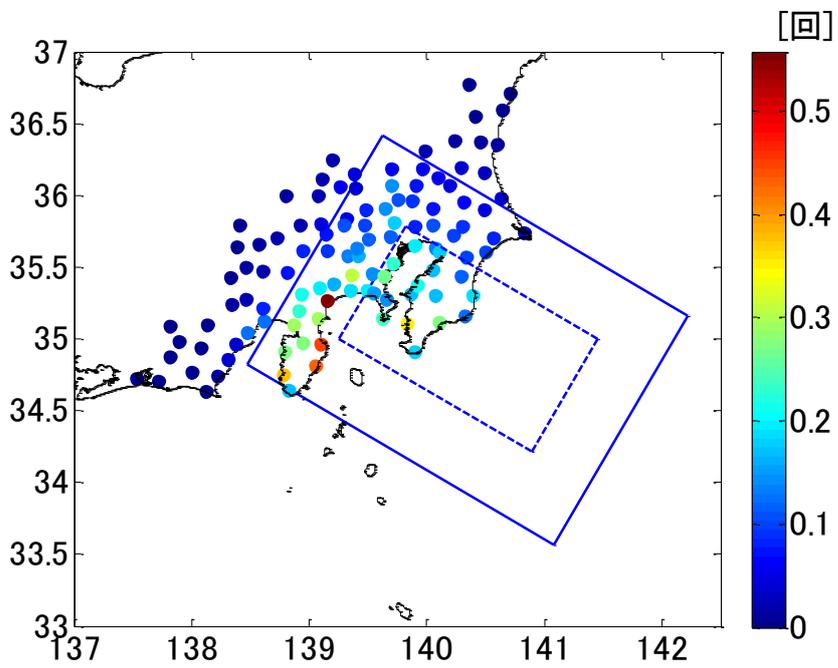


図 D. 2 応急活動期の震度 5 弱を超える余震数に関する余震ハザードマップ

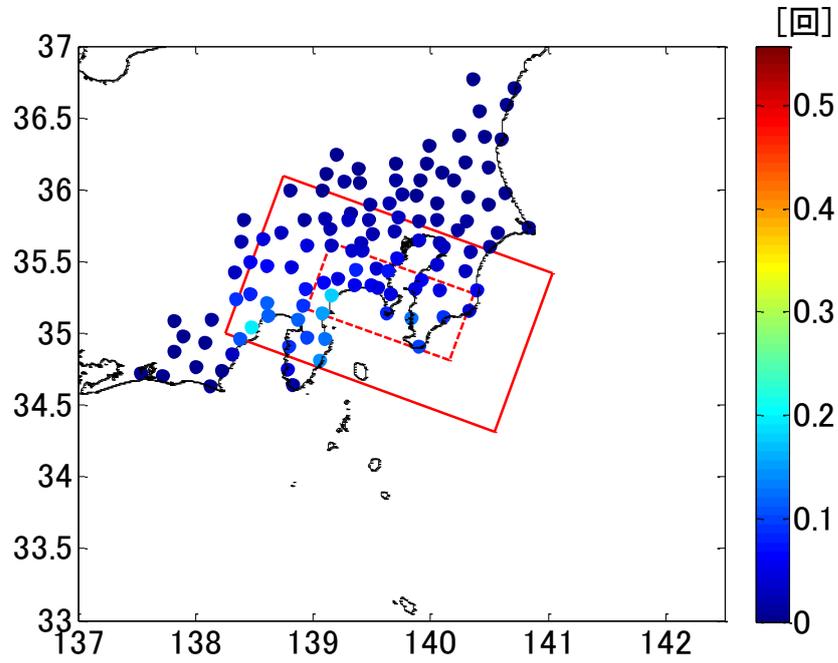
(a)  $M_m=7.9$ , 平均 $+\sigma$



(b)  $M_m=8.2$ , 平均 $+\sigma$



(c)  $M_m=7.9$ , 平均



(d)  $M_m=8.2$ , 平均

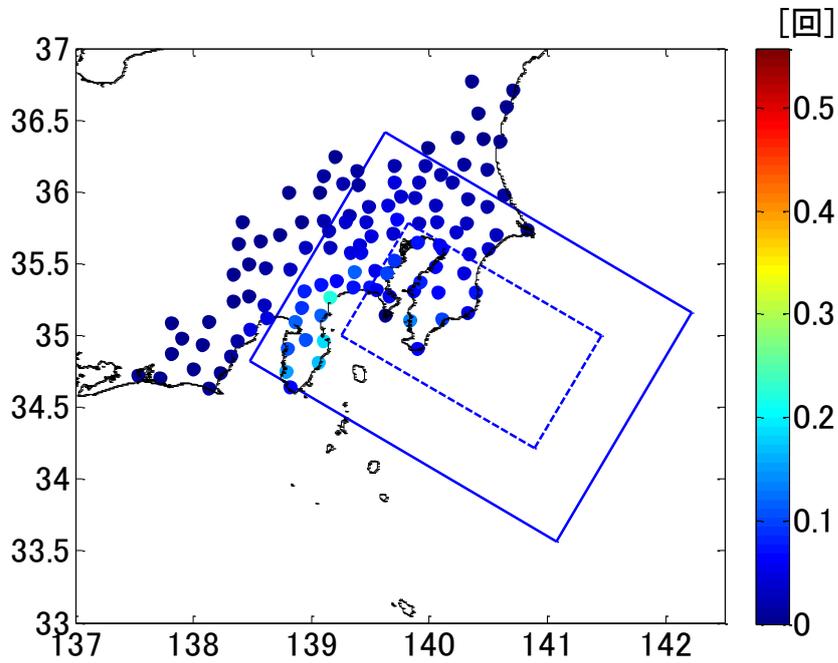


図 D. 3 復旧活動期の震度 5 弱を超える余震数に関する余震ハザードマップ

## 関連研究活動リスト

### [査読付き論文]

崔炳賢, 糸井達哉, 高田毅士: 地震後復旧活動計画のための確率論的余震発生モデルと余震ハザード評価の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 690 号, pp.1377-1383, 2013.08.

### [査読付き国際会議発表論文]

B.Choi, T.Takada : Probabilistic earthquake occurrence model of aftershock based on the 2011 Tohoku earthquake data, ISRERM2012, pp.200-204, 2012.08.

Byunghyun Choi, Tatsuya Itoi, Tsuyoshi Takada : Probabilistic aftershock occurrence model based on the 2011 Tohoku earthquake data, 15WCEE, 2012.09.

B.Choi, T. Takada, T. Itoi : Probabilistic aftershock hazard analysis based on 2011 Tohoku earthquake data, ICOSSAR2013, pp.1040, 2013.06.

### [査読なし国内学会発表論文]

崔炳賢, 糸井達哉, 高田毅士: 東北地方太平洋沖地震の余震発生記録の分析と時空間発生モデルの提案, 2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I , pp.437-440, 2012.03.

崔炳賢, 糸井達哉, 高田毅士: 巨大地震発生からの経過時間による余震発生の特徴について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.83-84, 2012.09.

崔炳賢, 糸井達哉, 高田毅士 : 地震後復旧活動計画のための余震ハザードマップの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1169-1170, 2013.08.

## 謝辞

本論文は東京大学大学院工学系研究科・高田毅士先生の御指導、御鞭撻のもとでまとめたものです。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を体験する前までは地震に関して無知だった私ですが、高田先生のお陰で巨大地震後の余震による地震動に興味を持つようになり、余震ハザード評価を研究テーマと設定することが出来ました。研究の方向性に悩んでいた際には、常に的確な御助言をしてくださり、ここまで進めることが出来ました。また、研究だけでなく、生活面においても常に気をかけていただきました。心から感謝と御礼を申し上げます。

東京大学大学院工学研究科・糸井達哉先生からは、大変貴重な観測記録から PGV を求めるプログラムを提供していただきました。また質問に対して常に丁寧に対応してください、特に学生の立場から見過ぎがちな事項についても適切に御助言してくださいました。深く感謝いたします。

論文の副査になって下さった、東京大学地震研究所・瀨瀬一起先生、名古屋大学大学院環境学研究科・森保宏先生、東京大学大学院工学系研究科・伊山潤先生からは大変貴重な御意見と御批判をいただき、本論文を完成することが出来ました。厚く御礼を申し上げます。

東京大学・磯村由紀子事務技官には研究に関する事務処理や会計の様々な作業に関する適切な御助言をいただき、研究に集中することが出来ました。また、高田研究室での4年間出会った先輩、後輩の御協力がなかったらここまで到達することが出来なかったと思います。心から感謝します。

また、博士課程中に東京大学の博士課程研究遂行協力制度(2010年~2013年)、日本学生支援機構の平成23年度私費外国人留学生学習奨励費、富士ゼロックス株式会社の小林節太郎記念基金(2013年)による経済的な支援を受けました。心から深く御礼申し上げます。

最後に自分の仕事を犠牲にし、なお東北地方太平洋沖地震の経験後にも常にそばで惜しみない理解と支援してくれた妻申恩晶と常に私のことを信じて待って下さった韓国にいる家族にも深く感謝します。

2014年3月

崔 炳賢