

南海トラフ巨大地震に向けた事前対策・
直後対応システム高度化の研究

2013年9月

浅原 裕

要旨

南海トラフ巨大地震に向けた事前対策・直後対応システム高度化の研究

2012年に南海トラフ巨大地震の断層モデルが策定され、従来の想定であった東海・東南海・南海地震モデルと比べて大きな被害が想定されている。これに伴い、事前対策・直後対応の見直しが必要とされている。本研究では、平成23年東北地方太平洋沖地震の経験を今後数十年以内に発生すると考えられる南海トラフにおける海溝型地震への対策に活かすための検討を行った。

第2章では、東北地方太平洋沖地震においてダムサイトで得られた地震波形を、経験的グリーン関数法を用いて再現した。その際、断層域が500 kmにも及び、同時に強震動生成域も広範囲に及ぶことから、強震動生成域ごとに異なる地震波をグリーン関数として採用した。波形合成の結果、このサイトでは宮城沖と福島沖の強震動生成域からの地震動がほぼ同時刻に到達することにより最大加速度値とその時刻を決めたことが分かった。強震動生成域とサイトの地理的關係・破壊伝播の方向により複数の強震動生成域の影響が重なり合うことがあり、これによりサイトによって最大加速度や地震動継続時間に大きな差が出る可能性があることを示した。

第3章では、東北地方太平洋沖地震で明らかとなった緊急地震速報の「限界」について検証した。大規模な地震の推定精度の限界については、大規模地震発生時には経験式による震度予測ではなく震源から一定範囲内のエリアに対して報知を行うという、地震動予報許可事業者がすぐに実施できる対策を示し、道路安全即時評価システムプロトタイプに組み込んだ。また、複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した際の誤報について、誤報の発生確率を定量化し、システムの運用形態変更の意思決定を補助する手法を開発した。

第4章では、第2章と第3章で得た巨大地震の経験を今後発生が想定される南海トラフにおける海溝型地震への対策に活かすための検討を行った。まず2012年に策定された南海トラフの巨大地震強震断層モデルの断層パラメータを使い、第2章で行ったように強震動生成域ごとに異なるグリーン関数を用いて徳島県内3地点における地震動波形の合成を行った。次に、この地震が発生した場合の緊急地震速報の発表シミュレーションを行った。その上で地震発生後の地震動と津波、それらに対応するための緊急地震速報や津波情報などの防災情報を同じ時間軸上に重ね合わせた。これにより、緊急地震速報（予報）のしきい値は震度4以下に設定すべきであることや、地震動が終息して津波の影響が出始めるまでの時間が少ない場所では10分未満であることなど、地震発生時に防災情報を活用するための課題をいくつか見いだすことができた。

キーワード: 平成23年東北地方太平洋沖地震, 緊急地震速報, 経験的グリーン関数法, 統計的グリーン関数法, 強震動

SUMMARY

Study on Improvement of the Disaster Prevention System toward the Scenario Nankai Trough Great Earthquake

The fault models of the scenario great earthquake at Nankai Trough were developed in 2012, and the scenario told that western Japan would suffer more serious damages from the earthquake than from the previous Tokai-Tonankai-Nankai Earthquake model. This scenario requires a re-examination of disaster-prevention measures. In this study, the countermeasures against the large earthquake at Nankai Trough which would occur within several decades were considered learning from the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake.

In Chapter 2, seismic waveforms at the base of a dam site during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake were reproduced using the empirical Green's function method. Three Green's functions were selected for each strong-ground-motion-area (SMGA), considering the 500 km long fault region and the SMGAs spread across a wide area. The comparison of the observed and the synthetic waves made it clear that nearly simultaneous arrivals of waves from SMGAs at off-shore Miyagi and Fukushima prefectures contributed the peak ground acceleration (PGA) value and the peak time at the target site. The overlapping of seismic waves from different SMGAs caused by the geographical relationship between the site and SMGAs and by the direction of fracture propagation could result in different PGA and duration time.

In Chapter 3, some limitations about Earthquake Early Warning (EEW) were examined which had become apparent during and after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. The author proposed a solution to the issues of underestimation of the magnitude and seismic intensities at major earthquakes that alarms were announced to the area within a certain definite range from the epicenter, not judging from seismic intensities estimated by the empirical equations. This solution is a method which a licensed business operator can take against the major earthquakes, and the author applied this solution to a prototype of decision-making support system for the expressway company. Also, for false alarms when two earthquakes occurred close to one another in spatially and in temporally, the author quantified the probability of false alarms and developed a decision-making support method for changing the operation form of the disaster prevention system.

In Chapter 4, some considerations were performed to apply the knowledge derived from Chapter 2 and 3 to the countermeasures towards the Nankai Trough Great Earthquake. At first, seismic waveforms of the scenario great earthquake models at Nankai Trough with 3 sites in Tokushima were synthesized on the statistical Green's function method setting different Green's functions for every SMGA as in the case in Chapter 2. Next, an announcement of the EEW by the model was simulated, then seismic waveforms, tsunami, EEW and tsunami warnings were overlaid on the same time axis. This simulation revealed the problems for utilizing the disaster prevention information efficiently; for example, the threshold intensity of EEW should be set lower than intensity 4 in JMA scale in these target sites, and it would take less than

10 minutes from the convergence of the seismic motion to the arrival of tsunami effect at southern Tokushima prefecture.

Keywords: the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Earthquake Early Warning, empirical Green's function method, statistical Green's function method, strong ground motion

目次

| | |
|--|-----------|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 概要 | 1 |
| 1.2 南海トラフの巨大地震 | 2 |
| 1.3 地震災害に対する意識の現状 | 4 |
| 1.4 緊急地震速報 | 6 |
| 1.4.1 緊急地震速報とは | 6 |
| 1.4.2 警報と予報 | 7 |
| 第2章 平成23年東北地方太平洋沖地震における地震動再現 | 11 |
| 2.1 はじめに | 12 |
| 2.2 観測記録の特徴 | 12 |
| 2.3 経験的グリーン関数法による本震波形再現 | 16 |
| 2.3.1 経験的グリーン関数法 | 16 |
| 2.3.2 震源モデル | 18 |
| 2.3.3 経験的グリーン関数の選定 | 19 |
| 2.3.4 波形合成計算 | 21 |
| 2.3.5 波形合成結果 | 24 |
| 2.3.6 経験的グリーン関数を複数設定した効果 | 28 |
| 2.4 特徴的パルスの再現 | 30 |
| 2.4.1 観測波における特徴的パルス | 30 |
| 2.4.2 統計的グリーン関数法 | 31 |
| 2.4.3 波形合成計算 | 33 |
| 2.4.4 波形合成結果 | 34 |
| 2.5 まとめ | 36 |
| 第3章 巨大地震時に発表される緊急地震速報の課題と活用法 | 39 |
| 3.1 はじめに | 40 |
| 3.2 緊急地震速報の課題の整理 | 40 |
| 3.2.1 特に大規模な地震に対する推定精度の限界 | 41 |
| 3.2.2 震度推計に経験式を用いることによる精度の限界 | 44 |
| 3.2.3 複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合 | 46 |
| 3.3 課題への対策 | 47 |
| 3.3.1 大規模な地震の震度推計 | 47 |
| 3.3.2 複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合の適切でない情報への対応 | 48 |
| 3.4 アプリケーション事例：緊急地震速報を用いた道路安全即時評価システム | 51 |
| 3.4.1 システムの目的 | 51 |
| 3.4.2 システム概要 | 51 |
| 3.4.3 適用範囲 | 54 |
| 3.4.4 実用化システム | 54 |

| | |
|---|------------|
| 3.5 まとめ | 55 |
| 第4章 南海トラフ巨大地震の地震動推定と情報の活用方法..... | 59 |
| 4.1 はじめに | 60 |
| 4.2 地震動の推定 | 60 |
| 4.2.1 断層モデル | 60 |
| 4.2.2 地震動推定対象地点 | 65 |
| 4.2.3 統計的グリーン関数法による波形合成 | 67 |
| 4.2.4 波形合成結果 | 68 |
| 4.2.5 地震動継続時間 | 90 |
| 4.3 緊急地震速報の発表シミュレーション | 93 |
| 4.3.1 シミュレーション手法 | 93 |
| 4.3.2 シミュレーション結果 | 94 |
| 4.3.3 警報の更新 | 98 |
| 4.4 情報の活用 | 98 |
| 4.5 まとめ | 101 |
| 第5章 結論 | 105 |

第1章 序論

Chapter 1: General Introduction

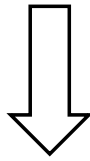
1.1 概要

2012年に南海トラフ巨大地震の断層モデルが策定され、従来の想定であった東海・東南海・南海地震モデルと比べて大きな被害が推定されている。これに伴い、事前対策・直後対応の見直しが必要とされている。一方で、南海トラフで大規模な地震が発生した時にどのように行動するのかという認識が高まっているとは言えない。その原因の一つとして、具体的に地震発生時の状況を想像できないことが挙げられる。地震発生直後の防災情報の一つとして緊急地震速報が挙げられるが、平成23年東北地方太平洋沖地震とその後の余震では有効に機能しない場面もあった。緊急地震速報の課題については本運用前から指摘されていたにも関わらず、具体的にどういったことが起きるかについての検討は、少なくとも地震動予報を行う事業者には欠けていた。

想定される南海トラフでの海溝型地震に対しては、ある程度科学的根拠を持った断層モデルが提案され、構造物の耐震設計などに用いられている。これと同じ考え方を緊急地震速報を例とした防災情報に持ち込み、事前対策として想定される断層モデルではどのタイミングでどのような情報が出されるのかシミュレーションを行う。この結果を断層モデルから合成した地震動波形と重ね合わせることで、地震発生時の状況を具体的にイメージすることができ、現在のシステムに不足している部分が明確になることで、直後対応システムを巨大地震に適用可能なものに修正することが可能となる。またこの結果は、一般の人が地震発生時の災害状況をイメージするトレーニング¹⁾に活用することもできると考えている。

本論文の流れを図1-1に示す。第2章と第3章では、平成23年東北地方太平洋沖地震について扱う。第2章では、ダムサイトで得られた地震動の再現を行う。第3章では、この地震で直面した緊急地震速報の「限界」について検証し、情報受信側でも可能な対策について示す。また、高速道路を対象に地震直後に優先的に点検を行うべき箇所の情報を提供し意思決定を支援するシステムのプロトタイプを紹介し、巨大地震への対応について述べる。第4章では、南海トラフで想定され

平成23年東北地方太平洋沖地震
(経験)



(第4章)南海トラフ巨大地震
(将来)

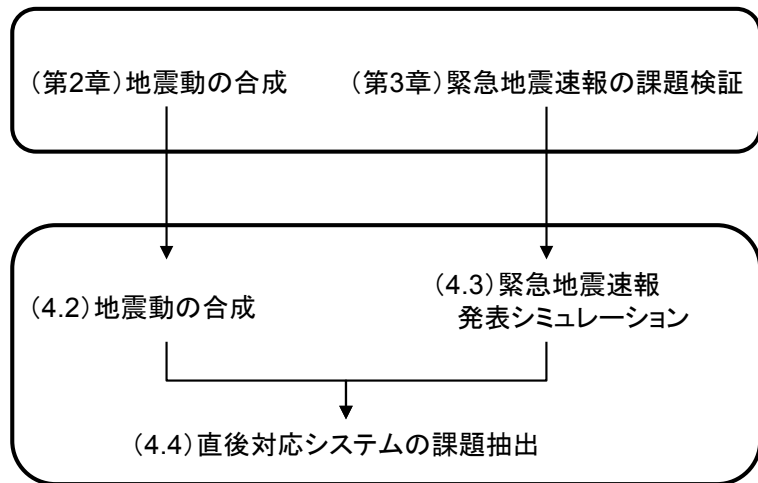


図 1-1:本研究の流れ.

ている海溝型地震について地震動波形の合成と緊急地震速報の発表シミュレーションを行う。これらの結果を同じ時間軸上で重ね合わせ、課題の抽出を行う。

1.2 南海トラフの巨大地震

南海トラフは、駿河湾から四国沖にかけてのフィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に沈み込む部分にできた海底の深い溝である。このプレート境界では東海地震・東南海地震・南海地震などのマグニチュード8クラスの大地震が約100から200年ごとに発生していることが知られている(図1-2)。また、これらの地震は歴史的に複数が連動して発生したこともある²⁾。このうち、駿河湾では100から150年の間隔で大規模な地震が発生しているが、1854年の安政東海地震から長らく発生していないため、相当なひずみが蓄積されており、発生が切迫している可能性があると考えられてきた³⁾。東南海・南海地震についても、前回1944年の東南海地震、1946年の南海地震を考慮すると、今世紀前半での発生が懸念されている。地震調査研究推進本部は、これまで各地震の30年発生確率(2013年1月1日現在)を、想定東海地震が88%(参考値*)、東南海地震が70~80%、南海地震が60%としていた²⁾が、2013年に個別の評価を見直し、南海トラフのどこかでマグニチュード8以上の地震が30年以内に起きる確率について60~70%と発表した⁴⁾。

これらの地震への対策として、これまで東海地震と東南海・南海地震それぞれ個別に対策が進められてきた。東海地震に対しては東海地震対策大綱(平成15年5月)⁵⁾が、東南海・南海地震対策大綱(平成15年12月)⁶⁾がそれぞれ決定された。東南海・東海地震対策大綱では、「今後、東海地震が相当期間発生しなかった場合には、東海地震と東南海・南海地震が連動して発生する可能性も生じてくると考えられるため、今後10年程度経過した段階で東海地震が発生していない場合には、東海地震対策と合わせて本大綱を見直すものとする。」としていたが、2011年に発生した東日本大震災による知見と策定から約10年間の知見の累積を元に、東海・東南海・南海地震の3連動とい

*東海地震は隣接する地域との連動性のメカニズムが未解明であり、発生確率を求めるためにいくつかの仮定をしている。そのため、長期評価結果として公表している他の海溝型地震の発生確率と同程度の信頼性はないことに留意する必要がある、参考値とされていた。

う巨大地震対策の必要性が出てきた⁷⁾。この3連動地震を、「南海トラフ巨大地震」と呼び、内閣府に設置された「南海トラフの巨大地震対策検討ワーキンググループ」が被害想定を行った。被害が最大となるケースを平成23年東北地方太平洋沖地震の実際の被害や2003年に作成されていた東海・東南海・南海地震の被害想定と比べると、地震・津波による人的被害、建物倒壊などの物的被害、ともにはるかに大きいとされている(表1-1)⁸⁾。南海トラフ巨大地震のモーメントマグニチュードは M_w 9.0とされ、東北地方太平洋沖地震と同程度であるが、東北地方太平洋沖地震に比べて陸地に近い場所で発生すること、名古屋などの大都市圏が含まれていることにより人口が大きいことが被害の大きさの理由に挙げられる。

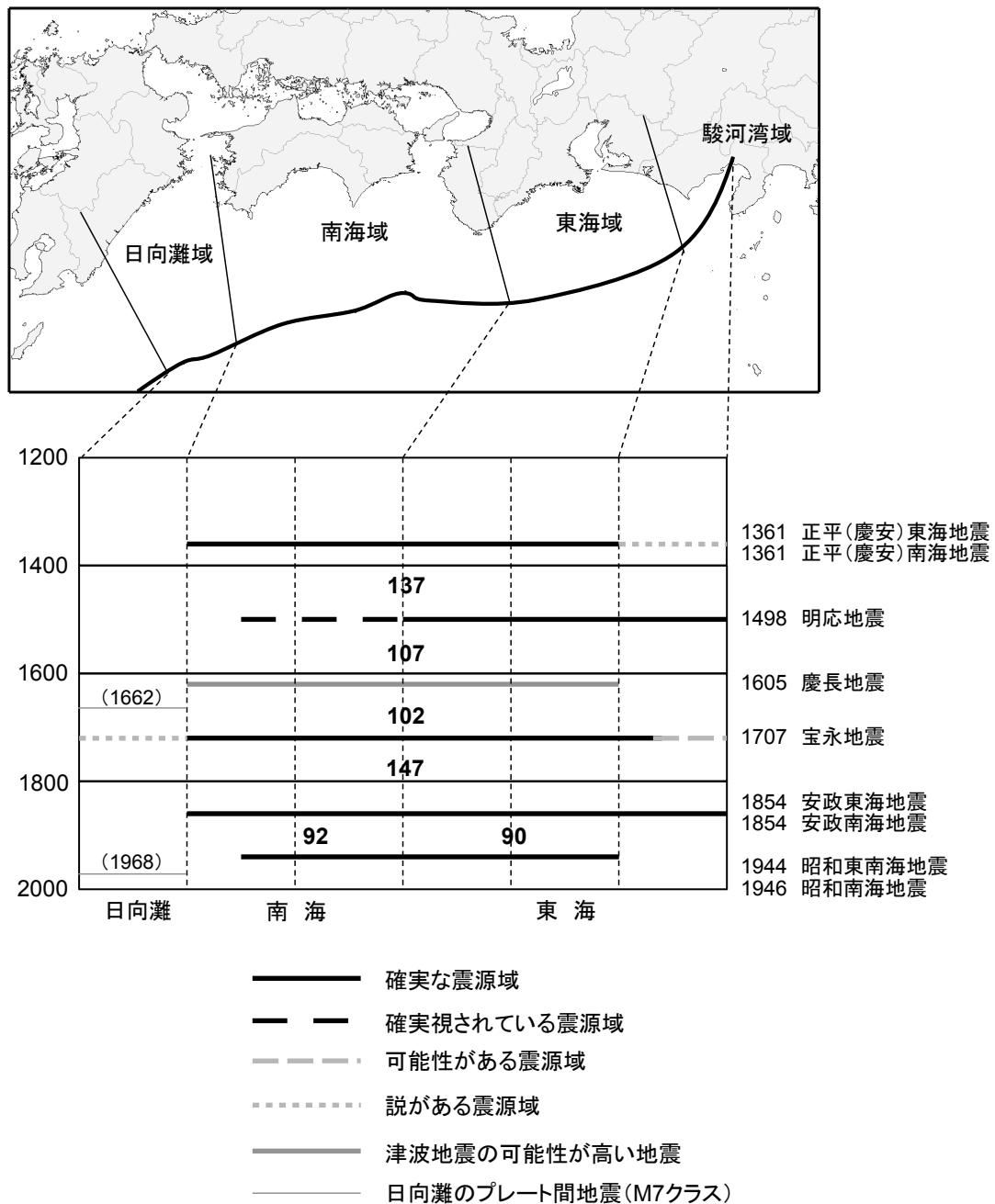


図 1-2: 南海トラフにおけるプレート境界地震の繰り返し履歴⁴⁾。

表 1-1: 南海トラフ巨大地震の被害が最大となるケースの、平成 23 年東北地方太平洋沖地震・2003 年想定モデルとの被害推定比較⁸⁾.

(a) 被害が最大となるケースと東北地方太平洋沖地震との比較

| | M_w | 浸水面積 | 浸水域内人口 | 死者・ 行方不明者 | 建物被害 (全壊棟数) |
|------------|-------|-----------------------|----------|--------------|----------------|
| 東北地方太平洋沖地震 | 9.0 | 561 km ² | 約 62 万人 | 約 18,800 人 | 約 13 万棟 |
| 南海トラフ巨大地震 | 9.0 | 1,015 km ² | 約 163 万人 | 約 323,000 人 | 約 239 万棟 |
| 倍率 | | 約 1.8 倍 | 約 2.6 倍 | 約 17 倍 | 約 18 倍 |

(b) 被害が最大となるケースと 2003 年東海・東南海・南海地震想定との比較

| | M_w | 浸水面積 | 浸水域内人口 | 死者・ 行方不明者 | 建物被害 (全壊棟数) |
|-----------|-------|-----------------------|----------|--------------|----------------|
| 2003 年想定 | 8.7 | | | 約 24,700 人 | 約 94 万棟 |
| 南海トラフ巨大地震 | 9.0 | 1,015 km ² | 約 163 万人 | 約 323,000 人 | 約 239 万棟 |
| 倍率 | | | | 約 13 倍 | 約 2.5 倍 |

1.3 地震災害に対する意識の現状

徳島県危機管理部南海地震防災課が、沿岸部に居住する住民に対し、2010 年のチリ地震津波と平成 23 年東北地方太平洋沖地震における避難動向調査を行っている^{9), 10)}。調査対象者は、1960 年のチリ地震津波の体験者が 38 %、津波体験者から体験談を聞いたことがある人までを含めると 80 %以上である。また、津波に備えた自己啓発等の設問に対しても、避難訓練への参加経験 60 %、シンポジウムなどへの参加 30 %（複数回答可）と、何らかの自己啓発を行っている人が 80 %を超えている（津波体験・自己啓発についての設問はチリ地震津波の調査でしか行われていないが、男女比・年齢層が両調査でほぼ同じ傾向であったことから、東北地方太平洋沖地震における調査でも類似の傾向であると推測できる）。このように、「意識が高い」と考えられる調査対象者であるが、実際に避難行動を取ったのは、津波警報が発表され避難勧告が発令されたチリ地震津波で 19.4 %、大津波警報が発表され避難勧告・避難指示が発令された東北地方太平洋沖地震では 31.3 %しかいなかった。避難しなかった理由を表 1-2 に示す。津波情報を全く入手していなかったから逃げなかったわけではなく、情報を知っていた上で、自ら大丈夫だろうと判断したか、周囲に逃げている人がいないのを見て大丈夫だと判断した人が多かったことが分かる。

これらの調査は、地震動が小さいか感じられない地震についての避難行動であるので、南海トラフでの大地震発生時とは感じる危機感が異なるかもしれない。しかし、自らの意思で避難行動に移せる人はそう多くないように思える。

一方で、東北地方太平洋沖地震における津波で、岩手県釜石市の小中学生約 3 千人のうち、津波襲来時に学校の管理下にあった児童・生徒は全員が無事であった。この地域では津波防災教育が盛んに行われており、その結果子どもたちが率先して避難を行い、難を逃れた¹¹⁾。子どもたちは教え込まれた「避難 3 原則」を実践できたとのことである。子どもたちの具体的な行動は文献 12) に紹介されている。

表 1-2: 徳島県のチリ地震津波・東北地方太平洋沖地震の避難動向調査における「なぜ避難しなかったのか、その主な理由は何ですか。(当てはまるもの3つまで)」という設問に対する回答^{9), 10)}.

(a) チリ地震津波に関する調査 N=294

| | |
|--|--------|
| 自分のいる場所が頑丈で津波より高い建物だったので、安全だと思ったから | 21.1 % |
| 1m程度の津波ならば、避難しなくても大丈夫だと思ったから | 45.6 % |
| 遠くで起きた地震のため、津波は来ないと思ったから | 12.2 % |
| テレビやラジオで他地域の状況を見聞きして、避難しなくても大丈夫だと思ったから | 63.6 % |
| 身体的に避難するのが困難、または家族に避難することが困難な人がいたから | 3.1 % |
| 家財や仕事のことなど心配事があったから | 2.4 % |
| 避難の呼びかけがなかった、または聞こえなかったから | 2.7 % |
| 近所の人たちが避難していなかったから | 20.4 % |
| どこに避難したらよいのか分からなかったから | 1.4 % |
| その他 | 8.8 % |
| 無回答 | 2.7 % |

(b) 東北地方太平洋沖地震に関する調査 N=844

| | |
|--------------------------------------|--------|
| (当初は) 今回の地震津波のことを知らなかった(気づかなかった)から | 13.5 % |
| 仕事中であったため(事業所で避難指示がなかったから) | 24.1 % |
| テレビなどで他地域の状況を見聞きして、避難しなくても大丈夫だと思ったから | 47.9 % |
| 遠くで起きた地震のため、津波は来ないと思ったから | 28.6 % |
| 自分のいる場所が頑丈で津波より高い建物だったので、安全だと思ったから | 10.7 % |
| 1m程度の津波ならば、避難しなくても大丈夫だと思ったから | 36.5 % |
| 身体的に避難するのが困難、または家族に避難することが困難な人がいたから | 4.0 % |
| 家財のことが心配だったから | 1.9 % |
| 避難の呼びかけがなかった、または聞こえなかったから | 13.0 % |
| 近所の人たちが避難していなかったから | 16.7 % |
| その他 | 12.8 % |

『想定にとられるな』

ハザードマップに示されるような浸水想定区域は、あくまで防災施設を建設する際の“想定外力”であって、それ以上の災害が起こる可能性があると思え。

→浸水想定区域外であったにも関わらず、それにとられることなく避難を行った。

『最善を尽くせ』

「ここまで来ればもう大丈夫だろう」ではなく、その時できる最善の対応行動をとれ。

→状況から判断し、あらかじめ決めておいた避難所よりもさらに高台の場所を目指した。

『率先避難者たれ』

いざという時には、まず自分が率先して避難すること。その姿を見て、他の人も避難するようになり、結果的に多くの人を救うことが可能となる。

→避難する中学生を見て、小学生は外へ避難した。

徳島県の調査の設問の中で、「今後発生が予想されている東南海・南海地震などによる津波に備

えて、行政に期待する津波防災対策は何ですか。」というものがある。両調査とも「情報伝達手段（屋外スピーカーなど）の整備」が高く期待されている。もちろん防災行政無線が聞きづらい地域についての改善は必要であるが、スピーカーの整備だけでは表 1-2 の結果からも分かるように、避難行動に移せる人の割合はあまり増えないであろう。情報を知った後にいかに行動に移せるか、あるいは情報を知らなくても行動に移せるかが課題となる。

住民に対して発表する情報自体の課題については、東北地方太平洋沖地震で気象庁から発表された津波警報の第 1 報で大きい津波でないとして自己判断して避難行動に移らなかった等が指摘されている¹³⁾。津波警報については、第 1 報発表時に過小な表現とならないような改善などが行われ、避難行動に結びつく表現に改められた¹⁴⁾。次に求められるのは、住民が災害発生時の具体的なイメージを行い、適切な行動に結びつけられるようにすることである。

1.4 緊急地震速報

1.4.1 緊急地震速報とは

緊急地震速報は 2007 年に本運用開始となり、工場・交通機関における自動制御やオペレータを介した手動制御、集客施設での館内放送、テレビ・ラジオ・携帯電話での地震動警報提供、事業者・家庭向けの地震動予報報知端末などを通じて「大きな揺れが来る前に知らせる情報」として活用されている¹⁵⁾。

緊急地震速報の原理は、震源に近い地震計で P 波をとらえて地震の発生位置と規模を瞬時に推定し、震源から離れた場所に対して P 波より振幅の大きい S 波（主要動）が到達する前に揺れの大きさを知らせることにある。地震波処理と情報伝達が瞬時で行えるならば、地震波が到達する前に情報を伝えることができるという発想は 100 年以上も前からあった¹⁶⁾が、技術的な制約のために近年まで実用化されていなかった¹⁷⁾。近年の地震波即時処理技術、地震観測網、情報伝達技術の発達により実現可能となってきた。

リアルタイム地震防災システムの考え方は、2つの種類に分類される¹⁸⁾。1つは Regional warning と呼ばれ、地震が発生しそうなエリアに密な地震観測網を構築し、センターに送られる観測情報（地震波形など）を元に震源情報（発生位置、規模等）を求めるものである。求められた震源情報は、情報を使いたい位置における揺れの大きさの予測に使用する。もう一つは On-site warning と呼ばれ、情報を使いたい位置に地震計を設置し、P 波検知後すぐにその位置の揺れがどの程度になるかを知らせるものである。

実用的な地震の早期警報システムとしては 1960 年代から新幹線向けのシステムで開発が始まった。現在ユレダス、コンパクトユレダスとして国内の新幹線網で広く使われている¹⁹⁾、²⁰⁾が、これらは基本的に On-site warning の考え方で設計されている。

一方で 2000 年代に入って気象庁、財団法人鉄道総合技術研究所、独立行政法人防災科学技術研究所などで早期警報のための手法が別々に開発された²¹⁾、²²⁾。2004 年、これらは 1 つの情報に統合されて「緊急地震速報」として実証実験が開始された。実証実験の範囲は拡大し、2007 年 10 月に本運用開始、同 12 月に地震動警報として位置づけられ、現在に至っている²³⁾。緊急地震速報は Regional warning の考え方である。Regional warning は On-site warning に比べて観測網の維持や通信

コストがかかること、複雑な処理を行うため時間がかかることなどのデメリットがあるが、国内の広い地域をカバーして情報提供を行うには Regional warning の考え方が適している。ただし、鉄道のような決まった対象点では On-site warning のほうが早く情報を出すことができる。

緊急地震速報が実用的なものとなったのは、a) 広範囲・高密度な地震観測網、b) 少ないデータから震源位置・規模を予測する技術、c) 情報を素早く伝達する情報通信技術が揃ったことによる¹⁵⁾。a)については、気象庁多機能型地震計約 220 箇所と防災科学技術研究所高感度地震観測網約 800 箇所の地震計の情報がリアルタイムで用いられており²⁴⁾、陸域では観測点の間隔は平均 20 km となっている。b)については、コンピュータ性能向上のほか、1つの観測点の P 波観測データから震源・マグニチュードを推定する手法、数点の観測点のデータから震源・マグニチュードを精度良く推定する手法などがある。c)については、気象庁から発表される情報をインターネットを使って即時に伝えたり、テレビやラジオの放送に割込みを入れたり²⁵⁾、携帯電話のキャリアが特定の地域にある端末に対して一斉に情報を伝える技術²⁶⁾がある。

1.4.2 警報と予報

気象庁が発表する緊急地震速報には、「警報」と「予報／業」の2種類がある²⁷⁾。これらの発表基準と更新条件の違いを表 1-3 に示す。「警報」は、テレビ・ラジオなどのメディアや携帯電話の一斉同報サービスを使って伝達され、「最大震度 5 弱以上の揺れが予測された時に、強い揺れ（震度 4 以上）が予想される地域に対し地震動により重大な災害が起こるおそれのある旨を警告して発表するもの」である。警報は、気象業務法により気象庁のみが発表を行うと定められている。従って、テレビ・ラジオなどは独自の情報を付け加えることなく発表を行う。

一方で、民間の事業者が緊急地震速報サービス（多くの場合は有料）として提供しているのは、「予報」または「業」と呼ばれるものである。気象庁長官の許可を得た地震動予報業務許可事業者（以下、許可事業者と呼ぶ）が、気象庁が最大震度 3 以上またはマグニチュード 3.5 以上と予想された時に発表する「緊急地震速報（予報）」に含まれる予報資料に基づいて、震度及び主要動到達時刻の予想を行い、利用者に「緊急地震速報（業）」を提供する。気象庁からの予報資料には、地震の震源情報（発生時刻・震央位置・震源の深さ・マグニチュード等）が記載されており、許可事業者は、利用者端末の位置における震度などの揺れの大きさや主要動到達時刻の計算を行い、その結果を利用者に提供する。実際に計算を行うのは、許可事業者の配信サーバ（この場合、端末は計算結果を出力するのみ）であったり、利用者のところに設置した端末（この場合、配信サーバは予報資料を端末に配信するのみ）であったりするが、計算の方法や報知などの出力条件・方法につい

表 1-3: 緊急地震速報の予報・警報の発表基準・更新条件の違い。

| | 緊急地震速報（予報） | 緊急地震速報（警報） |
|------|---------------------------------------|--|
| 発表基準 | 最大震度 3 以上又はマグニチュード 3.5 以上と予想された場合。 | 地震波が 2 点以上の観測点で観測され、最大震度が 5 弱以上と推定された場合。 |
| 更新条件 | 地震波検知の観測点増加とともに更新。 | 震度 3 以下と推定されていた地域が震度 5 弱以上と推定された場合。 |
| 利用方法 | 許可事業者が予測震度などの情報に加工して「緊急地震速報（業）」として提供。 | 気象庁から発表された警報を伝達。 |

ては、許可を受けた範囲内で許可事業者ごとに独自に決めることができる。許可事業者は、気象庁から発表される情報に付加価値を付けて情報提供していることになり、この点が「警報」の伝達とは異なる。

参考文献

- 1) 目黒公郎：間違いだらけの地震対策，旬報社，194 pp.，2007.
- 2) 文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフの地震の長期評価について，2001年9月27日.
- 3) 石橋克彦：東海地方に予想される大地震の再検討 駿河湾地震の可能性，*地震予知連絡会会報*，**17**，126 - 132，1977.
- 4) 文部科学省地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について，2013年5月24日.
- 5) 中央防災会議：東海地震対策大綱，2003年5月29日.
- 6) 中央防災会議：東南海・南海地震対策大綱，2003年12月.
- 7) 内閣府：東海地震、東南海・南海地震対策の現状，<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/index.html>，2013年5月31日閲覧.
- 8) 内閣府防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告），2012年8月29日.
- 9) 徳島県危機管理部南海地震防災課：チリ津波地震に関する避難動向調査について，<http://anshin.pref.tokushima.jp/docs/2012083100032/>，2010年12月21日.
- 10) 徳島県危機管理部南海地震防災課：東日本大震災に関する避難動向調査，2011.
- 11) 片田敏孝：東日本大震災にみる命の分岐点，特定非営利活動法人リアルタイム地震情報利用協議会特別講演会，2011年6月3日.
- 12) 土木学会：インタビュー 釜石市における津波防災教育，*土木学会誌*，**96** (8)，23 - 28，2011.
- 13) 気象庁：東北地方太平洋沖地震における津波被害を踏まえた津波警報の改善の方向性について（最終とりまとめ），http://www.jma.go.jp/jma/press/1109/12a/tsunami_kaizen_matome.html，2011年9月12日.
- 14) 気象庁：東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善，http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tsunami_keihou_kaizen/20tsunami_keihou_kaizen_all.pdf，2012年3月.
- 15) 気象庁：緊急地震速報について，<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/portal/index.html>，2013年5月31日閲覧.
- 16) Cooper, J. D.: Letter to Editor, *San Francisco Daily Evening Bulletin*, Nov. 3, 1868.
- 17) Kanamori, H., Hauksson, E. and Heaton, T.: Real-time seismology and earthquake hazard mitigation, *Nature*, **390**, 461 - 464, 1997.
- 18) Kanamori, H.: Real-time seismology and earthquake damage mitigation, *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, **33**, 195 - 214, 2005.
- 19) Nakamura Y.: Real-Time information systems for seismic hazards mitigation UrEDAS, HERAS and PIC, *Query Report of RTRI*, **37** (3), 112 - 127, 1996.
- 20) Nakamura Y. and Saita, J.: UrEDAS, the earthquake warning system: today and tomorrow. In: Gasparini, P., Manfredi, G. and Zschau, J. (eds) *Earthquake Early Warning Systems*, 249 - 281, Springer, 2007.

-
- 21) Odaka, Y., Ashiya, K., Tsukada, S., Sato, S. Ohtake, K. and Nozaka, D.: A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**, 526 – 532, 2003.
 - 22) Horiuchi, S., Negishi, H., Abe, K., Kamimura, A. and Fujinawa, Y.: An Automatic processing system for broadcasting earthquake alarms, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 708 – 718, 2005.
 - 23) 渡辺実：緊急地震速報 そのとき、あなたは、どうしますか？，角川 SCC 新書 048, 184 pp., 2008.
 - 24) 緊急地震速報利用者協議会：緊急地震速報利用の手引き, 2012.
 - 25) Asahara, H., Matsumoto, H., Kamiya, K., Sakurai, O., Kato, K., Nagasaka, H. and Inuzuka, F.: Development and operation of Early Earthquake Warning system for radio broadcasting, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Earthquake Early Warning*, 62 – 64, 2009.
 - 26) 菅野崇亮：緊急地震速報を対象の地域の携帯電話に配信する緊急速報「エリアメール」の紹介, 2010年地震研究所研究集会「揺れる直前の地震動予測：さらなる迅速化と精度の向上」, <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/yure2010/09sugano.pdf>, 2013年5月31日閲覧.
 - 27) 気象庁：緊急地震速報を適切に利用するために必要な受信端末の機能及び配信能力に関するガイドライン, 2011.
 - 28) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Transactions American Geophysical Union*, **79**, 579, 1998.

第2章 平成23年東北地方太平洋沖地震における地震動再現

Chapter 2: Investigation of Seismic Records of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

Abstract

福島県にあるダムサイトの基礎で得られた平成23年東北地方太平洋沖地震における地震動加速度波形について、近隣のKiK-netの地中観測記録と比較を行った。また、断層領域の大きさを考慮して5つの強震動生成域(SMGA)に対してダムサイトで得られた3つの中小地震記録を経験的グリーン関数に設定し、本震の観測波形の再現を行った。最大加速度とスペクトルについては良好に再現できたが、加速度が最大となる時刻については再現できなかったため、別の震源モデルで波形合成を行った。2種類の波形合成結果から、対象サイトでは離れた宮城沖と福島沖の生成域からの地震動が小さな時間差で到達することで、加速度が最大値となる時刻を決めていたことが明らかとなった。

Seismic waveforms of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake recorded at the base of a dam site in Fukushima prefecture were analyzed comparing bore-hole motion records of the KiK-net stations, and were reproduced on the empirical Green's function method. Three empirical Green's functions were prepared to five strong-motion-generation-areas (SMGAs) model, considering the spread of the fault area. The observed peak ground acceleration (PGA) values and Fourier spectra were roughly explained by the synthetic, but the observed PGA time could not be explained. So we synthesized using another fault model, strong-motion pulse generation area (SPGA) model. The comparison of the observed and synthetic waves made it clear that nearly simultaneous arrivals of waves from SMGAs or SPGAs at off-shore Miyagi prefecture and off-shore Fukushima prefecture contributed the PGA value and the peak time at the target site.

2.1 はじめに

2011年3月11日に発生した平成23年東北地方太平洋沖地震 (M_w 9.0) (以下、本震と呼ぶ) において、福島県にあるダムサイトで継続時間が4分を超える地震記録が得られた。この地震については、遠地地震波^{例えは 1), 2)}、強震記録^{例えは 3), 4), 5), 6)}や地殻変動記録^{例えは 7)}を用いて断層破壊過程が解析されている。既往の研究では、着目する振動数により地震動の発生源が異なる結果が得られているが、地震動を発生させた領域が複数存在しており、それらが時間差を持って破壊したことは共通している。巨大地震において断層破壊が複数のステージに分かれて起きることは、2004年のスマトラ沖地震 (M_w 9.0) や2012年のスマトラ沖地震 (M_w 8.6) でも共通に見られることである^{8), 9)}。

本章ではまず、ダムサイトで得られた地震動記録の特徴を示し、最大加速度・フーリエスペクトルともに最寄りのKiK-net (独立行政法人防災科学技術研究所 基盤強震観測網)¹⁰⁾観測点記録のうち地中記録に近いことを示す。ダム基礎で得られた地震動波形は、基盤における地震動と類似する特徴を持っており、表層近くの堆積層の影響をほとんど受けていないことから、波形合成などの解析に適していると言える。

次に、本震後の余震や以前に起きた中小地震による記録波形をグリーン関数とし、経験的グリーン関数法¹¹⁾を用いて本震の地震動の再現を試みた。震源モデルにはKurahashi and Irikura(2011)⁵⁾を用いた。グリーン関数として選ぶ中小地震は、合成対象とする大地震と共通の震源特性・伝播特性・サイト特性を持つ必要がある。今回の計算では、本震の断層領域が長さ約500 km×幅約200 kmと広範囲に及ぶことから、それぞれの強震動生成域で異なるグリーン関数を設定した。別々のグリーン関数を設定する効果の検証として、全ての強震動生成域に共通のグリーン関数を設定した場合との比較を行った。

Kurahashi and Irikura(2011)モデルでは、本震で得られた最大加速度やフーリエスペクトルをおおよそ説明できたが、観測波のピーク時刻を説明できなかった。そこで、震源に近い太平洋沿岸の堆積層の影響の小さい観測点で見られるパルス波形を元に作られた震源モデル³⁾を使い、統計的グリーン関数法¹²⁾を用いて再現を行った。2種類の波形合成結果から、対象ダムサイトでは離れた宮城沖と福島沖の強震動生成域からの地震動が同時期に到達することで加速度の最大値を決めていたことが分かった。

2.2 観測記録の特徴

解析対象とする地震動波形が得られたダムサイトは、福島県にあるロックフィルダムである。サイトの位置を図2-1に示す。地震計はダムの天端、両岸の監査廊と監査廊底部に設置されており、ここではダム上部構造の影響をあまり受けていないと考えられる監査廊底部の記録を扱う。図2-2のダム標準断面図内に解析対象とする地震計の設置位置を示す。図2-3に東北地方太平洋沖地震における上下流成分・ダム軸成分の水平2成分の加速度時刻歴波形を示す。使用している加速度センサーの測定振動数範囲は0.1~30 Hzである。継続時間4分を超える241秒の記録が得られており、水平2成分合成の最大加速度 (Peak Ground Acceleration, 以下PGA) は41 galであった。記録開始時刻は14:47:16であり、地震発生約58秒後である。図2-1に示す本震の震源位置・発生時刻と

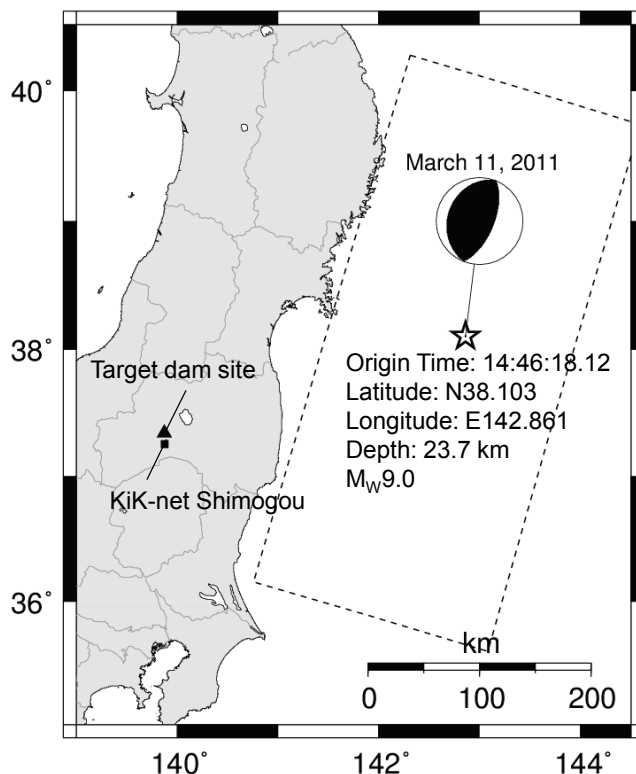


図 2-1: 対象ダムサイト位置(三角形), 最寄りの KiK-net 観測点である下郷観測点位置(四角形), 本震の震央位置(星印)と断層領域(破線).

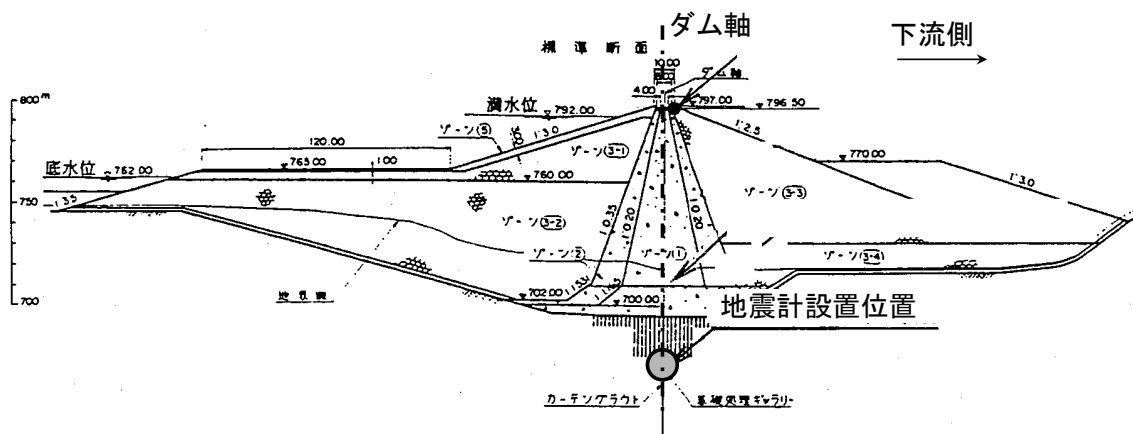


図 2-2: 対象ダムサイトの標準断面図. 解析対象とする地震計の設置位置を示した.

JMA2001 走時表¹³⁾から計算した当該地点における P 波・S 波到達時刻はそれぞれ, 14:46:58.4, 14:47:28.2 であるので, 破壊開始点から放出された P 波がダムサイトへ到達してから約 18 秒後からの記録が得られていることになる.

対象ダムサイトから約 10 km 離れたところには, KiK-net 下郷観測点 (FKSH05) があり, 本震において地表の水平 2 成分合成 PGA が 230 gal, 地中 (GL-105m, 公開されているボーリング柱状図によると $V_s = 1400$ m/s) で 54 gal を記録していた. 地中の値はダム基礎における PGA に近い値である. 下郷観測点における地中水平 2 成分加速度時刻歴波形を図 2-4 に示す. 横軸の時刻について

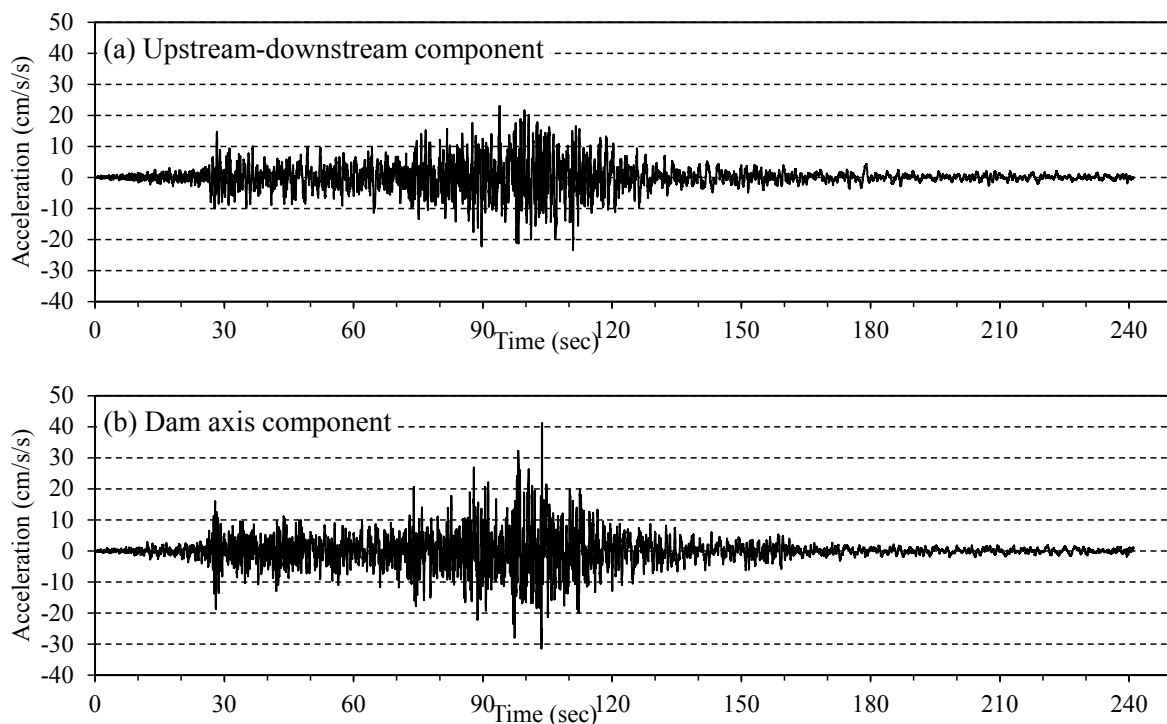


図 2-3: ダム基礎で得られた水平 2 成分の加速度時刻歴波形 (記録開始時刻は 14:47:16, 記録長は 241 秒).
 (a) 上下流成分, (b) ダム軸成分.

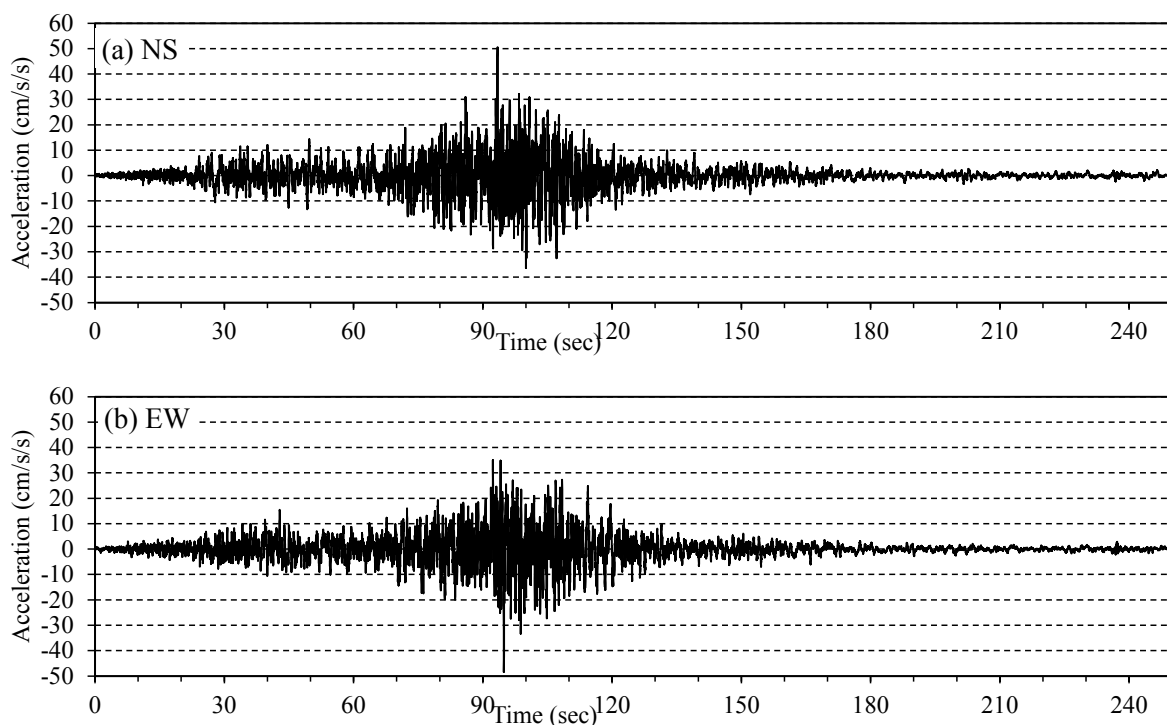


図 2-4: KiK-net 下郷観測点 (FKSH05) の地中 (GL-105m) における水平 2 成分加速度時刻歴波形. (a) NS 成分, (b) EW 成分. 横軸の基準時刻は 14:47:16 としている.

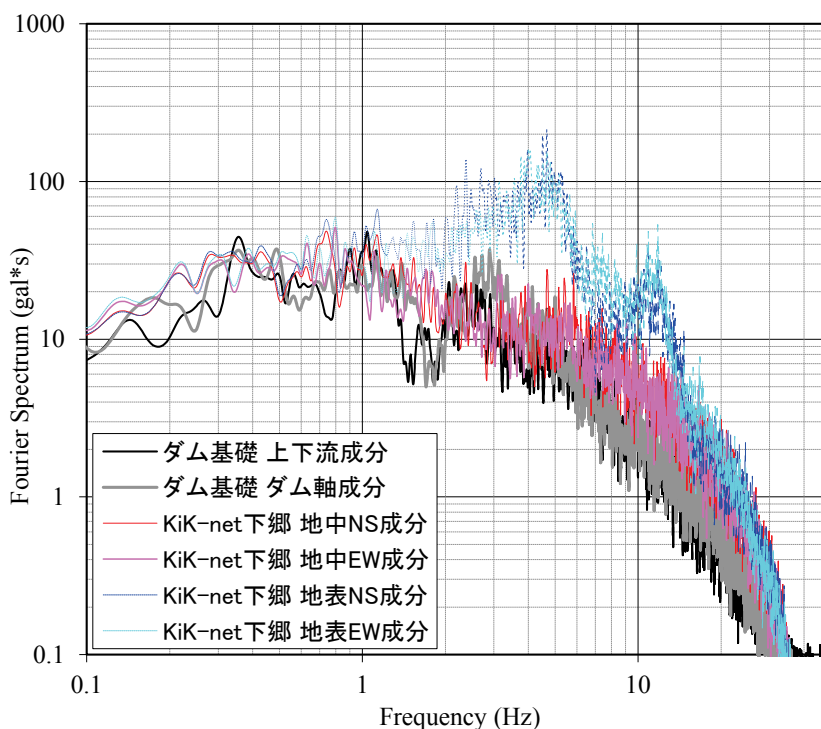


図 2-5:ダム基礎とKiK-net 下郷観測点(FKSH05)の地中・地表におけるフーリエスペクトル比較.

は、ダムサイト記録と比較しやすいよう、図 2-3 と揃えてある。KiK-net 地中の時刻歴波形は、グラフ中 70 sec から 120 sec の期間の振幅が大きいなど、対象ダムサイトの時刻歴波形と形状が類似していることが分かる。また、ダム基礎と KiK-net 地中・地表のフーリエスペクトル（平滑化のためにバンド幅 0.05 Hz の Parzen Window を適用）を比較する（図 2-5）と、ダム基礎におけるフーリエスペクトルは、広い振動数帯域において KiK-net 地中のものと近い性質を示している。KiK-net 地表のスペクトルは、表層地盤の影響を受けて大きく増幅している。ダム基礎におけるフーリエスペクトルでは、KiK-net 地中と比べて 1.8 Hz 付近で落ち込みがあるが、後の節で紹介する中小地震でも共通に現れていることから、上部構造物の共振の影響を受けているものと考えられる。この振動数は、ロックフィルダムのダム高と固有周期の関係¹⁴⁾の範囲内にある。

次に構造物への影響の観点から、減衰定数 0.05 の加速度応答スペクトル（Acceleration Response Spectrum, 以下ARS）を比較する（図 2-6）と、こちらも類似した傾向を示し、周期 0.1 sec から 0.5 sec で高くなる特性を示している。図 2-6 には照査用下限加速度応答スペクトル^{*15)}も示したが、スペクトル形状は類似しているものの、観測された応答スペクトルの大きさはその 5 分の 1 程度であり、ダムの耐震性能評価で用いるべき地震動の大きさに比べると小さいものであった。ダム基礎における水平 2 成分合成PGAの大きさとARSがKiK-net地中のものと近いこと、ダム基礎におけるARSが周期 0.1 sec から 0.5 sec の範囲で大きくなる特徴を持つことは、松本他(2012)¹⁶⁾が東北地方のダムにおいて行った調査結果と一致していた。

* 「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針」によれば、ダムの耐震性能を評価する際には、ダム地点において現在から将来にわたって考えられる最大級の強さを持つ地震動（レベル2地震動）に対し、地震時に損傷が生じたとしてもダムの貯水機能が維持され、修復可能な範囲にとどまることを評価する。レベル2地震動としては、将来発生すると推定される地震動、ダム地点またはその近傍で過去に実際に観測された最大の地震動のほか、「照査用下限加速度応答スペクトル」を有する地震動を照査用地震動として設定することを求めている。

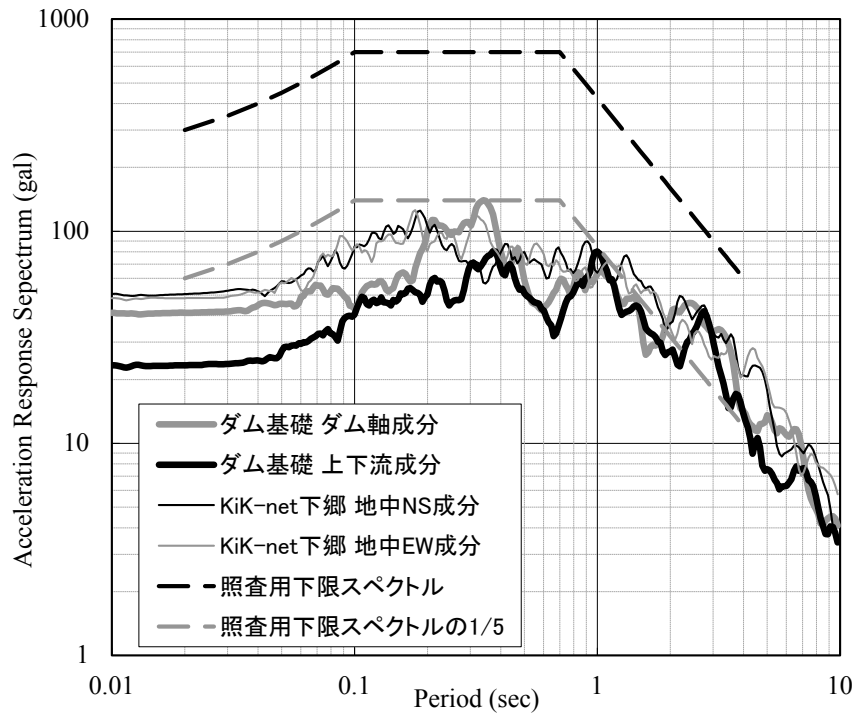


図 2-6:ダムサイト基礎と KiK-net 下郷観測点 (FKSH05)における水平方向加速度応答スペクトル(減衰定数 0.05)の比較. 照査用下限加速度応答スペクトルとその 1/5 の大きさのスペクトルも併記した.

以上のことから、ダム基礎で観測された地震動は、一部の振動数においてダム上部構造の影響は受けるものの、基盤における地震動と類似した特徴を示しており、波形合成などの解析に使用するデータとして適していると言える。

2.3 経験的グリーン関数法による本震波形再現

2.3.1 経験的グリーン関数法

経験的グリーン関数法は、余震などの中小地震による地震動をグリーン関数として重ね合わせて大地震の地震動を作成する手法である。本手法は、地震動予測手法のうち「半経験的手法」に分類されるもので、震源の破壊過程やサイト固有の特性を反映した地震動を作成できるという利点がある¹⁷⁾。本手法による強震動予測の概念¹⁸⁾を図 2-7 に示す。中小地震の観測記録に既に伝播特性やサイト表層の地盤特性が含まれているという考えのもと、大地震と中小地震の震源特性の違いの補正を行った上で、断層の破壊過程を考慮して中小地震を要素断層として大地震の地震動を策定する。用途としては、将来発生が想定される地震についての対象地点を限定した地震動策定^(例えば 19), 20), 21)のほかに、大地震の観測記録から逆に震源モデルを求める用途でも広く使われている^(例えば 3), 5), 22)。

地震動の重ね合わせには、Irikura(1986)¹¹⁾による波形合成法を用い、各中小地震を独立した断層破壊イベントとみなして合成する。1つの強震動生成域から発生する地震動の重ね合わせは式 2-1 から式 2-3 により行う²³⁾。強震動生成域を断層長さ方向・幅方向に中小地震の断層領域の大きさに

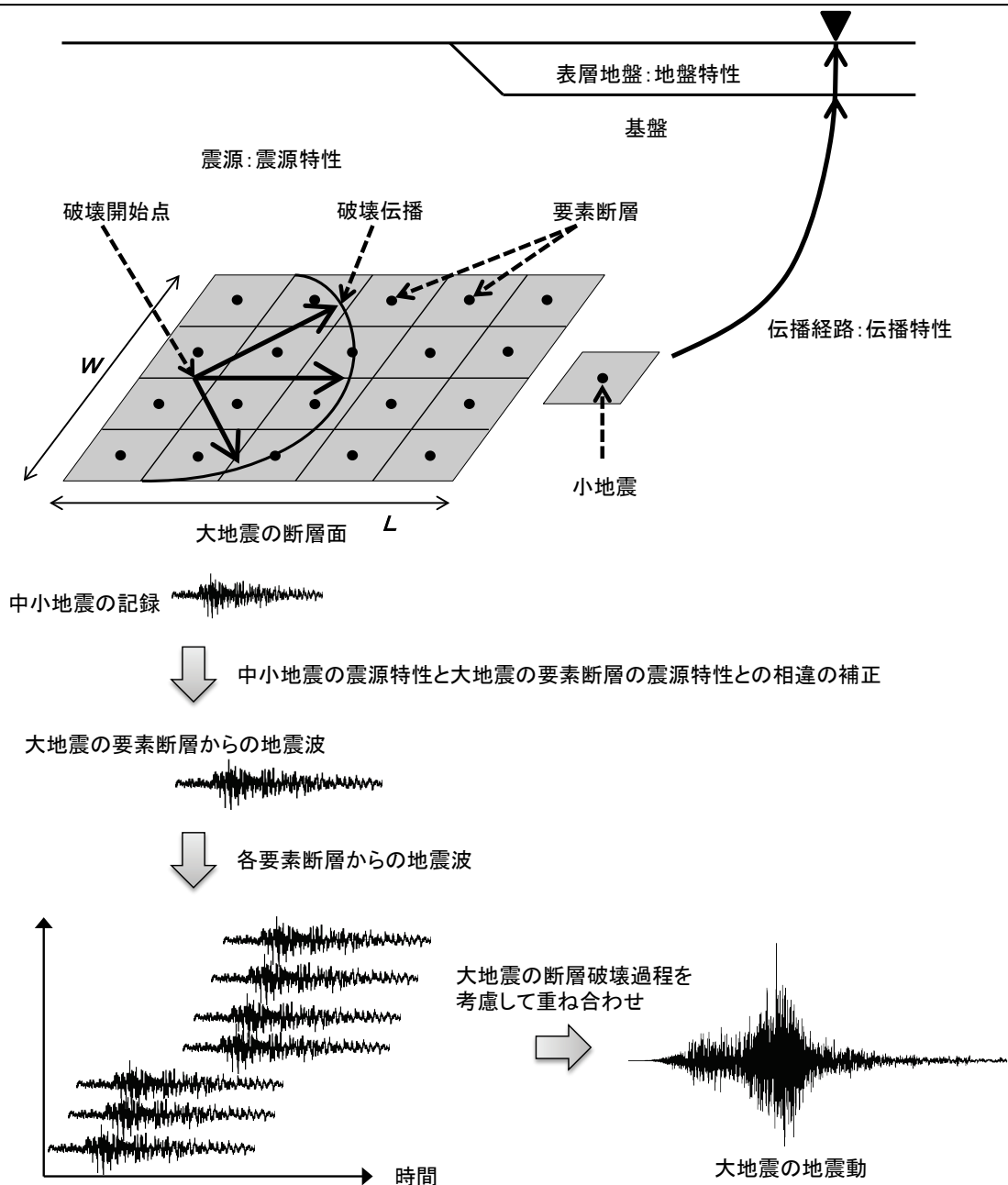


図 2-7: 半経験的手法による強震動予測の概念図¹⁸⁾

分割し、すべり量についても分割を行う。強震動生成域全体は、中小地震と比較して $N_L \times N_W \times N_D$ 倍のスケールとなる。複数の強震動生成域を設定する場合には、これらの計算を強震動生成域の数だけ行うこととなる。

$$U(t) = \sum_{i=1}^{N_L} \sum_{j=1}^{N_W} \frac{r}{r_{ij}} \cdot F_{ij}(t) * \{c \cdot u(t)\} \quad \text{式 2-1}$$

$$F_{ij}(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \cdot \frac{1}{1 - e^{-1}} \sum_{k=1}^{(N_D - 1)n'} \exp\left(-\frac{k-1}{(N_D - 1)n'}\right) \cdot \delta\left\{t - \frac{(k-1)\tau}{(N_D - 1)n'} - t_{ij}\right\} \quad \text{式 2-2}$$

$$t_{ij} = \frac{r_{ij} - r_0}{V_S} + \frac{\xi_{ij}}{V_r} \quad \text{式 2-3}$$

表 2-1: 経験的グリーン関数法の重ね合わせ式で使用する変数.

| 変数 | 単位 | 意味 |
|-----------------|-------|---------------------------------|
| $U(t)$ | gal | 強震動生成域全体からの地震動 |
| $u(t)$ | gal | グリーン関数 (中小地震の時刻歴波形) |
| $F_{ij}(t)$ | 1/sec | 大地震と中小地震のすべり速度時間関数の違いを補正するための式 |
| r | m | 中小地震の震源距離 |
| r_{ij} | m | ij 要素から評価サイトまでの距離 |
| N_L, N_w, L_D | — | 断層の走向、幅、くい違い量に対する分割数 |
| τ | sec | 強震動生成域のライズタイム |
| n' | — | 波形の重ね合わせの際に現れる見かけの周期性を除去するための整数 |
| r_0 | m | 強震動生成域の破壊開始点から評価サイトまでの距離 |
| ξ_{ij} | m | 破壊開始点から ij 要素までの距離 |
| V_S | m/s | 地震基盤における平均 S 波速度 |
| V_r | m/s | 破壊伝播速度 |

ここで、式 2-1 の「*」はたたみこみ積分(Convolution)を表す。これらの式で使われている変数の意味は表 2-1 の通りである。グリーン関数 $u(t)$ を応力降下量比と震源距離について補正を行った上で、断層長さ方向・幅方向・食い違い量分重ね合わせている。式 2-2 はくいちがい量の合成で中小地震と大地震のすべり速度時間関数の違いを補正する。ここで、 n' は中小地震のすべり関数を等間隔に配置することによるみかけの周期性を除去するためのパラメータである。 n' を大きくすると、第二項は幅 τ のボックス関数に収束する²⁴⁾。式 2-3 の右辺第一項は震源距離の違いによる地震波到達時間差を示し、第二項は破壊伝播における遅れを示している。実際の計算では、たたみこみ積分は周波数空間上で行った。

2.3.2 震源モデル

本震の震源モデルは、複数の研究により報告されているが、震源（破壊開始点）より浅部（海溝軸側）に大きなすべりが求められる結果と、震源より深部（陸側）に求められる結果とがある。地殻変動や遠地波形を用いた解析^{例えば 1), 2), 7)}では前者の傾向があり、強震波形を用いた解析^{例えば 4), 5)}では後者の傾向がある。

本研究では、短周期側の地震動合成を行うことから、強震動記録から作られた Kurahashi and Irikura(2011)⁵⁾モデルをベースとする。このモデルは、KiK-net の地中記録から経験的グリーン関数法で求められたものである。5つの強震動生成域（Strong Motion Generation Areas, 以下 SMGA）から構成され、いずれも断層領域の西側（陸側）に位置しているために広範囲で大きな加速度が観測されたと考えられる。本計算では、式 2-1, 式 2-2 の計算で各 SMGA がグリーン関数とする中小地震の整数倍となるよう、オリジナルモデルの微調整を行う（2.3.4 波形合成計算で説明）。なお、Kurahashi and Irikura(2011)モデルは、後に Irikura and Kurahashi(2012)²⁵⁾で改訂されているが、ここでは改訂前のものを使用している。

2.3.3 経験的グリーン関数の選定

当該サイトでは、これまでに本震を除いて本震の震源域あるいはその周辺で発生した地震によるもので、記録時間40秒以上の時刻歴波形が9記録されている。これら9記録がグリーン関数の候補となる。9地震の震源パラメータ・断層パラメータを図2-8・表2-2に示す。地震発生時刻と震源位置の情報は、気象庁一元化処理震源リスト²⁶⁾を使用し、CMT解については防災科学研究所のF-net²⁷⁾による。Event-1から-5は本震後に発生した地震であり、Event-6から-9は本震以前に発生した地震である。

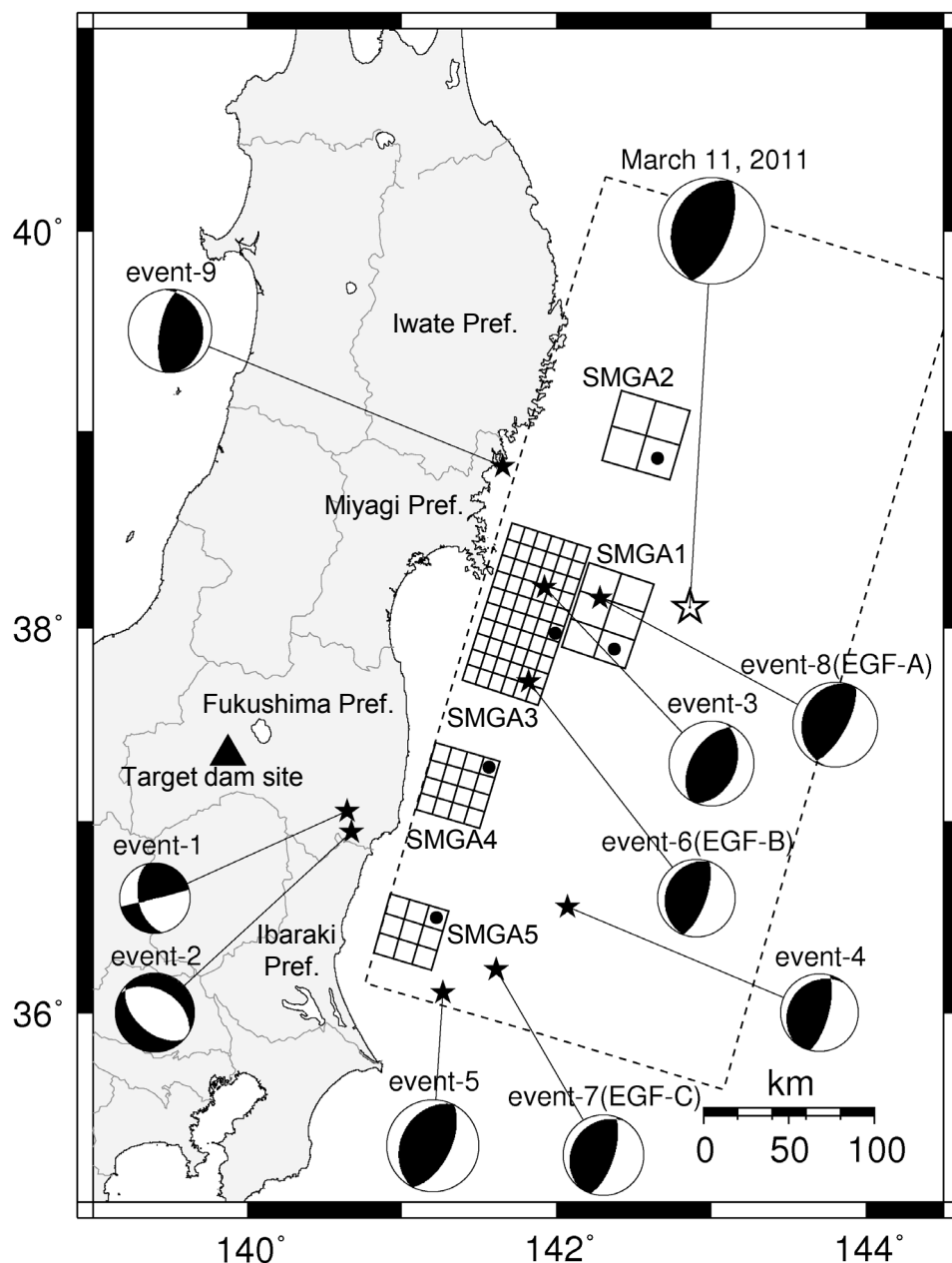


図 2-8: 本震の断層領域(破線)と経験的グリーン関数の候補である中小地震の震央位置(星印)とCMT解. SMGA(実線)については、中小地震の断層領域の大きさに区切られている。SMGA内の黒丸で示された地点は破壊開始点。

表 2-2: 本震と経験的グリーン関数の候補である中小地震の震源パラメータ. 地震発生時刻と震源位置は気象庁一元化処理震源リストのデータを使用, CMT 解については F-net による. グリーン関数として選択した中小地震の応力降下量と断層領域の大きさは 2.3.4 で決定した.

| | Main shock | Event-1 | Event-2 | Event-3 | Event-4 |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Orign Time | 2011/03/11 14:46:18.12 | 2011/04/12 14:07:42.28 | 2011/04/12 17:16:12.02 | 2011/04/07 23:32:43.46 | 2011/03/11 16:14:56.80 |
| Latitude (deg) | 38.103 | 37.053 | 36.946 | 38.204 | 36.555 |
| Longitude (deg) | 142.861 | 140.643 | 140.673 | 141.920 | 142.069 |
| Depth (km) | 23.7 | 15.1 | 6.4 | 65.9 | 20.0 |
| M_w | 9.0 | 5.9 | 6.6 | 7.1 | 6.5 |
| Strike (deg) | 22/200 | 76/167 | 132/301 | 211/20 | 15/220 |
| Dip (deg) | 91/88 | 89/51 | 50/41 | 50/40 | 71/21 |
| Rake (deg) | 63/27 | 141/2 | -82/-99 | 97/81 | 81/113 |
| M_0 (Nm) | 1.07E+22 | 7.05E+17 | 9.58E+18 | 4.74E+19 | 6.16E+18 |
| Continue | | | | | |
| | Event-5 | Event-6 (EGF-B) | Event-7 (EGF-C) | Event-8 (EGF-A) | Event-9 |
| Orign Time | 2011/03/11 15:15:34.47 | 2010/03/14 17:08:04.18 | 2008/05/08 01:45:18.77 | 2005/08/16 11:46:25.74 | 2003/05/26 18:24:33.42 |
| Latitude (deg) | 36.108 | 37.724 | 36.228 | 38.150 | 38.821 |
| Longitude (deg) | 141.265 | 141.818 | 141.608 | 142.278 | 141.651 |
| Depth (km) | 43.2 | 39.8 | 50.6 | 42.0 | 72.0 |
| M_w | 7.8 | 6.5 | 6.8 | 7.1 | 7.0 |
| Strike (deg) | 26/209 | 20/199 | 18/216 | 29/194 | 190/350 |
| Dip (deg) | 59/31 | 69/21 | 68/24 | 69/22 | 69/22 |
| Rake (deg) | 89/92 | 91/89 | 83/107 | 96/76 | 97/71 |
| M_0 (Nm) | 5.66E+20 | 6.83E+18 | 1.97E+19 | 5.43E+19 | 3.49E+19 |
| Stress drop (MPa) | | 21.2 | 31.2 | 21.3 | |
| Area (km ²) | | 84.6 | 132 | 339 | |

ここで, 5つの SMGA でグリーン関数として使用する中小地震の選定を行う. グリーン関数として用いる中小地震は, 対象とする大地震と共通の震源特性・伝播特性・サイト特性を持つ必要がある. 通常の波形合成では, 1つのグリーン関数を用いるが, ここでは断層領域が長さ約 500 km×幅約 200 km と広域に及ぶことを考慮して, それぞれの SMGA に対してそれぞれ適当なグリーン関数を選択した. 選択の基準は, 震源メカニズムが類似していることと伝播特性が共通とみなせること(中小地震の震源位置が SMGA に近いこと)である.

SMGA1 と 2 の共通のグリーン関数としては, Event-8 (2005 年 8 月 16 日, M_w 7.1) を選択した(以後, 経験的グリーン関数 Empirical Green's Function の 1 つ目として, EGF-A と呼ぶ). SMGA3 と 4 に共通のグリーン関数として, Event-6 (2010 年 3 月 14 日, M_w 6.5) を選択した(以後, EGF-B

と呼ぶ). SMGA5のグリーン関数としては, Event-7 (2008年5月8日, M_w 6.8) を選択した (以後, EGF-Cと呼ぶ). ここで, Event-1とEvent-2の震央はSMGA4に近いが, 本震のようなプレート間地震ではなく陸側プレート内の地震であり²⁸⁾, メカニズムが本震と大きく異なることから, グリーン関数として採用しなかった. Event-3の震央は震源域内にあるが, プレート間地震ではなくスラブ内地震である²⁹⁾ので, グリーン関数として選択しなかった. また, Event-5のマグニチュードは M_w 7.8であり, 地震の規模と断層長 (L [km]) の経験式³⁰⁾

$$\log L = 0.5M_w - 1.85 \quad \text{式 2-4}$$

からすると断層長は100 kmを超え, 複数のSMGAを持つ構造を持っている可能性があり, この地震自体が波形合成対象となる規模であることから, グリーン関数として使用するには規模が大きすぎると判断して採用しなかった.

2.3.4 波形合成計算

選択した中小地震を経験的グリーン関数として使用するためには, 中小地震の応力降下量と断層領域の大きさの情報が必要である. EGF-Bと-Cについては, KiK-netの地中記録を使ってコーナー周波数を求め (図 2-9), Boore(1983)³¹⁾によるコーナー周波数とモーメントの関係式から応力降下量を求めた.

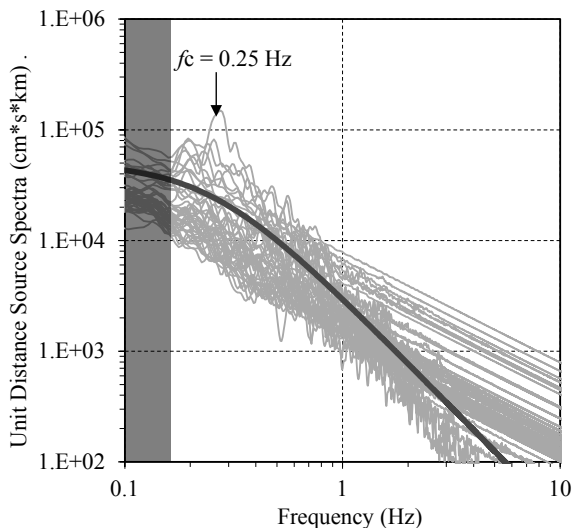
$$f_c = 0.49 \cdot V_s \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad \text{式 2-5}$$

ここで,

f_c : コーナー周波数 [Hz]

V_s : 平均S波速度 [m/s]

(a) EGF-B



(b) EGF-C

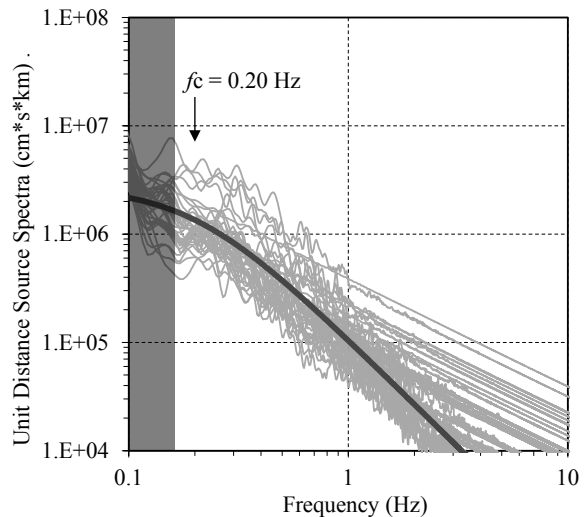


図 2-9: グリーン関数に選んだ中小地震(a) EGF-B, (b) EGF-CのKiK-net地中記録における変位スペクトル. ここからコーナー周波数をEGF-Bについては0.25 Hz, EGF-Cについては0.20 Hzと求めた. 影を付けた0.15 Hzより低い振動数は波形合成計算では扱わない.

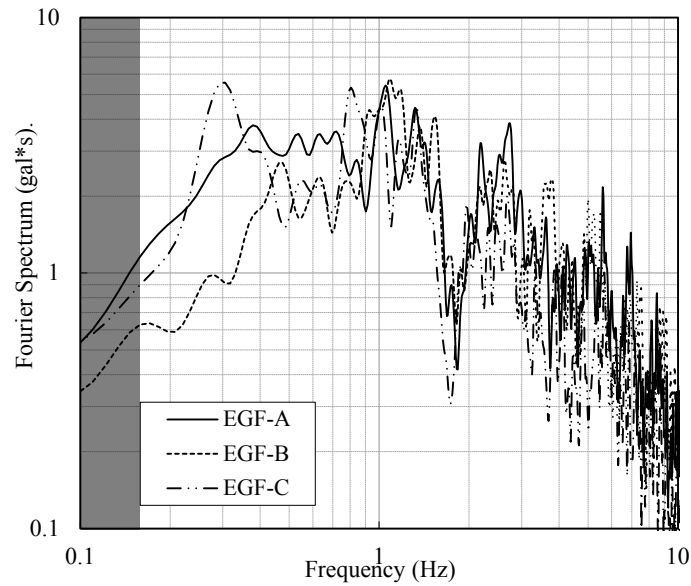


図 2-10: グリーン関数に用いた 3 つの中小地震の加速度フーリエスペクトル(上下流成分)比較. 1 Hz におけるフーリエスペクトル強度で規格化している.

表 2-3: 各 SMGA における断層パラメータ.

| | SMGA1 | SMGA2 | SMGA3 | SMGA4 | SMGA5 |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| L (km) | 55.2 | 36.8 | 92.0 | 36.8 | 34.5 |
| W (km) | 36.8 | 36.8 | 55.2 | 36.8 | 34.5 |
| $N_L \times N_w \times L_D$ | $3 \times 2 \times 7$ | $2 \times 2 \times 3$ | $10 \times 6 \times 11$ | $4 \times 4 \times 4$ | $3 \times 3 \times 2$ |
| M_0 (Nm) | 2.28E+21 | 6.52E+20 | 4.51E+21 | 4.37E+20 | 3.55E+20 |
| Stress drop (MPa) | 39.9 | 23.4 | 39.7 | 16.3 | 25.9 |
| Delay time from origin time (sec) | 15.64 | 66.42 | 68.41 | 109.71 | 118.17 |
| Rise time (sec) | 3.3 | 3.3 | 4.9 | 3.3 | 3.1 |
| EGF | EGF-A | EGF-A | EGF-B | EGF-B | EGF-C |

$\Delta\sigma$: 応力降下量 [Pa]

M_0 : モーメントの大きさ[Nm] である.

なお、図 2-9 において 0.15 Hz より低い振動数は合成計算では扱わないとして影を付けているが、これは久田(1999)²⁴が指摘しているように、この手法では長周期パルス波などコヒーレントな地震動の再現が困難であること、また使用する中小地震に低振動数成分がほとんど含まれていないことを考慮したものである。また、振動センサーの低振動数側の感度が 0.1 Hz までであることも考慮している。

一般に低振動数(長周期)の地震動合成については、差分法や離散化波数法など地震波の伝播特性と表層地盤の増幅特性を弾性波理論により理論的に評価する方法が用いられる。その上で、長周期側の理論的方法と短周期側の半経験的方法を適切な接続周期でフィルタして足し合わせるハイ

ブリッド法が用いられる¹⁷⁾。本研究では長周期地震動については扱わないため、半経験的方法のみで波形合成を行う。

次に、断層領域の大きさは、Brune(1970³²⁾, 1971³³⁾による円形クラックモデルから求めた。

$$f_c = 0.37 \cdot \frac{V_s}{r} \tag{式 2-6}$$

ここで、 r は円形クラックの半径を示し、 πr^2 で断層領域の大きさを示すこととなる。

一方でEGF-Aについては、断層モデルがKamae(2006)³⁴⁾やSuzuki and Iwata(2005)³⁵⁾などにより提案されている。提案されているモデルは、いずれも2つの主たるすべりから構成されている。そこで、2つの主たるすべりの面積の和を中小地震の断層領域の大きさとみなし、応力降下量をEshelby(1957)³⁶⁾による円形クラック式を使って求めた。

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \cdot \frac{M_0}{r^3} \tag{式 2-7}$$

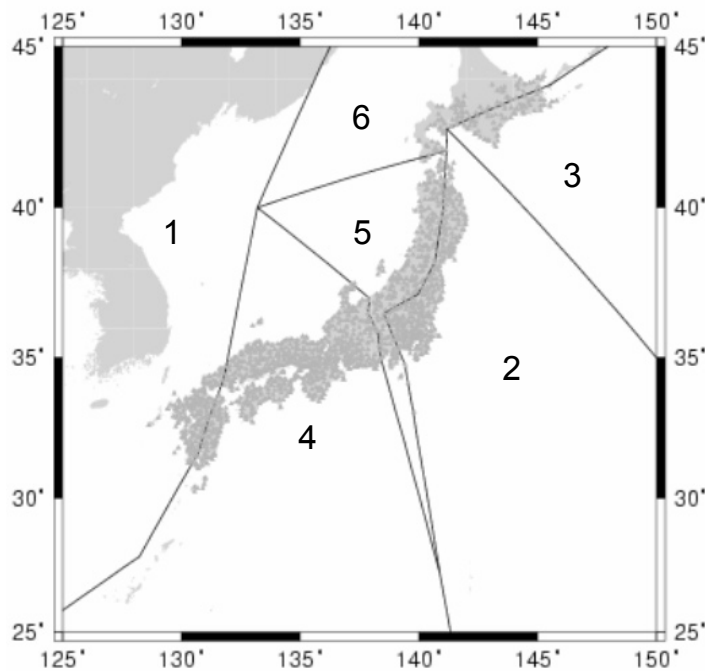


図 2-11: 川瀬・松尾(2004)³⁸⁾による Q_s 値解析対象区分。

表 2-4: 川瀬・松尾(2004)³⁸⁾による各領域で推定された Q_s 値。

| 地震タイプ | プレート間 | プレート内 | 内陸 |
|-------|---------------|----------------|----------------|
| 領域 1 | $51 f^{0.76}$ | $67 f^{0.64}$ | $112 f^{0.70}$ |
| 領域 2 | $93 f^{0.89}$ | $115 f^{0.77}$ | $243 f^{0.69}$ |
| 領域 3 | $91 f^{0.86}$ | $149 f^{0.73}$ | — |
| 領域 4 | $99 f^{0.66}$ | $114 f^{0.69}$ | $204 f^{0.65}$ |
| 領域 5 | $51 f^{0.70}$ | $175 f^{0.45}$ | $163 f^{0.75}$ |
| 領域 6 | $39 f^{0.95}$ | $41 f^{0.87}$ | — |

こうして求められた中小地震の応力降下量と断層領域の大きさを表 2-2 に示す。グリーン関数として選択した中小地震の加速度フーリエスペクトル（上下流成分）を比較したものを図 2-10 に示す。時刻歴波形の振幅が異なるため、1 Hz におけるフーリエスペクトル強度で規格化している（EGF-B は 2.2 倍、EGF-C は 1.6 倍）。図 2-10 から、1 Hz より高い振動数領域ではグリーン関数の振動数特性の違いは小さいが、1 Hz 以下の振動数領域では特性の違いが大きく、この違いが震源特性・伝播特性の違いを表すこととなる。

次に、各 SMGA の断層領域の長さ・幅・くい違い量が中小地震の整数倍となるよう調整を行った。調整した各 SMGA の長さ・幅・モーメント・応力降下量等のパラメータを表 2-3 に示す。各 SMGA からの地震動を合成するにあたり、SMGA 領域を各グリーン関数の断層領域と同じサイズの矩形断層に分割した（図 2-8）。SMGA のライズタイム τ は、片岡ら(2003)³⁷⁾による経験式

$$\tau = \frac{0.25 \times W}{V} \quad \text{式 2-8}$$

により求めた。平均 S 波速度と破壊伝播速度は、Kurahashi and Irikura(2011)⁵⁾にならい、それぞれ 3.5 km/s、2.8 km/s とした。 Q_s 値は、川瀬・松尾(2004)³⁸⁾によるインバージョン解析で求められた全国 6 領域の地震タイプ（プレート間・プレート内・内陸）ごとの Q_s 値（図 2-11・表 2-4）のうち、領域 2 のプレート間での値

$$Q_s = 93f^{0.89} \quad \text{式 2-9}$$

を用いた。波形合成計算には、野津・菅野(2008)³⁹⁾のプログラムを元に必要な変更を行ったプログラムを用いた。

2.3.5 波形合成結果

前項で説明した方法で波形合成した結果について説明する。図 2-12 に水平 2 成分の加速度時刻歴波形（ハイパスフィルタにより 0.15 Hz より低い振動数帯域をカットしたもの）を、図 2-13 にフーリエスペクトル（バンド幅 0.05 Hz の Parzen Window を適用）を、観測波形とともに示す。時刻歴波形の時刻原点は地震発生時刻とした。時刻歴波形について、観測波形の初期微動部分（図 2-12 で観測波形の記録開始時刻である 58.12 秒から約 75 秒までの 15 秒間程度）が合成波形で存在していないのは、観測装置の仕様で中小地震では振幅の小さい初期微動部分は記録されず、S 波到達後の振幅の大きい部分の記録しか保存されないことと、地震発生（破壊開始）から SMGA1 の破壊開始までの地震波を考慮していないためである。また、合成波形が 215 秒頃に終了していることも、グリーン関数に用いた記録の記録時間が短いことと、SMGA 以外の背景領域を考慮していないためである。

最大加速度については、上下流成分では 24 gal (実測 23 gal)、ダム軸成分では 38 gal (実測 41 gal) とそれぞれの成分で実測と同程度の大きさが得られた。時刻歴波形の形状に目を向けると、80 秒から 120 秒頃の前半とそれ以降の後半の 2 つの部分から構成されている。二度の大きな揺れから構成されることについては再現することができたが、前半については観測波形より合成波形が大きく求まり、後半の地震動のピークとなる時刻には差が見られた（観測では 150 秒より後に地震動のピークがあるが、合成では 150 秒より前にピークがある）。このような差はあるものの、本計算が 5 つの SMGA から来る地震波のみを扱い、SMGA 以外の背景領域からの地震波を全く考慮していないにも関わらず主要な振動の継続時間や最大加速度を再現していることから、背景領域が地震動に

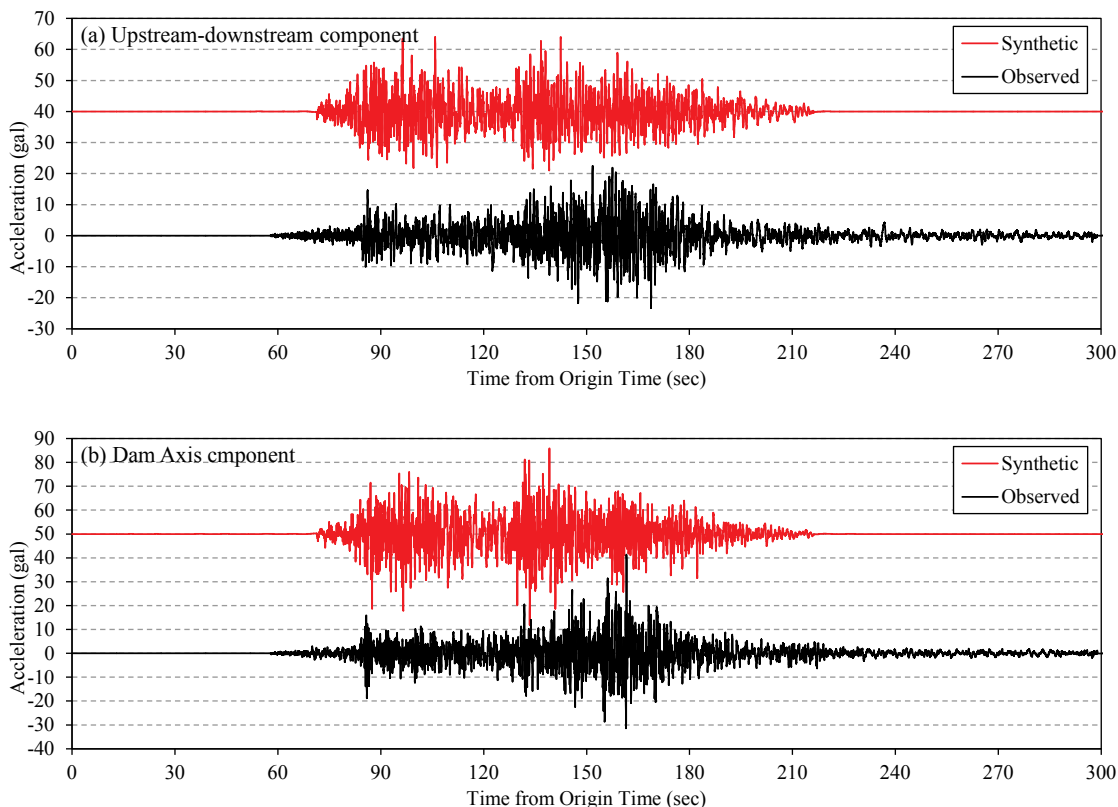


図 2-12: ダム基礎で観測された加速度時刻歴波形と経験的グリーン関数法(各 SMGA に個別のグリーン関数を設定)を用いて合成した加速度時刻歴波形の比較。(a) 上下流成分, (b) ダム軸成分。横軸時刻の基準時刻は地震発生時刻。時刻歴波形は、0.15 Hz より低い振動数成分をカットするフィルタ処理を行った。

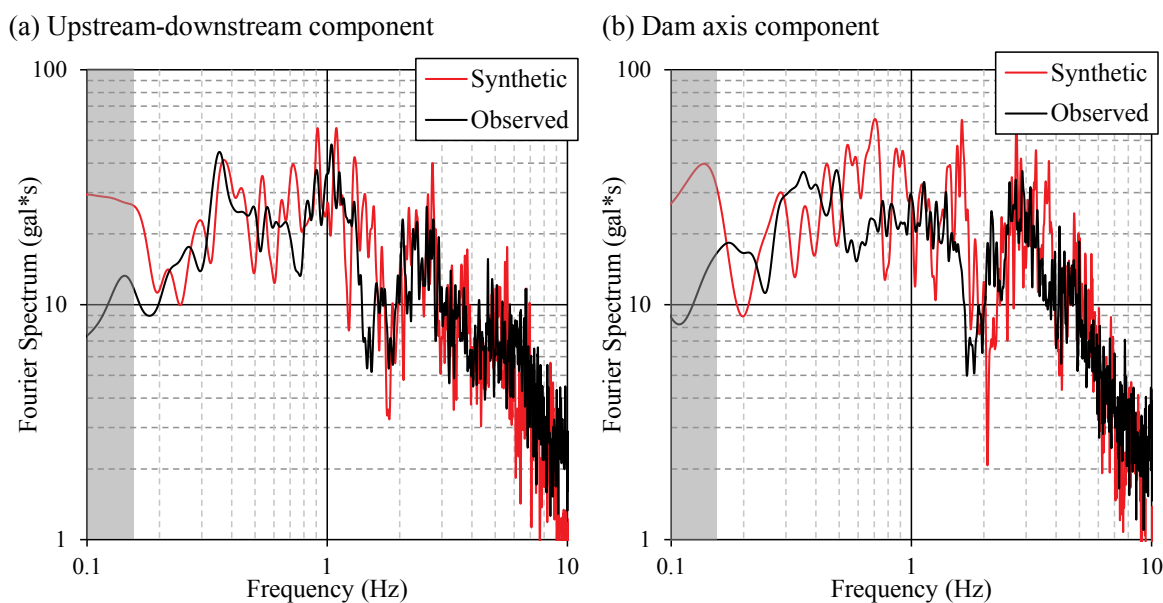
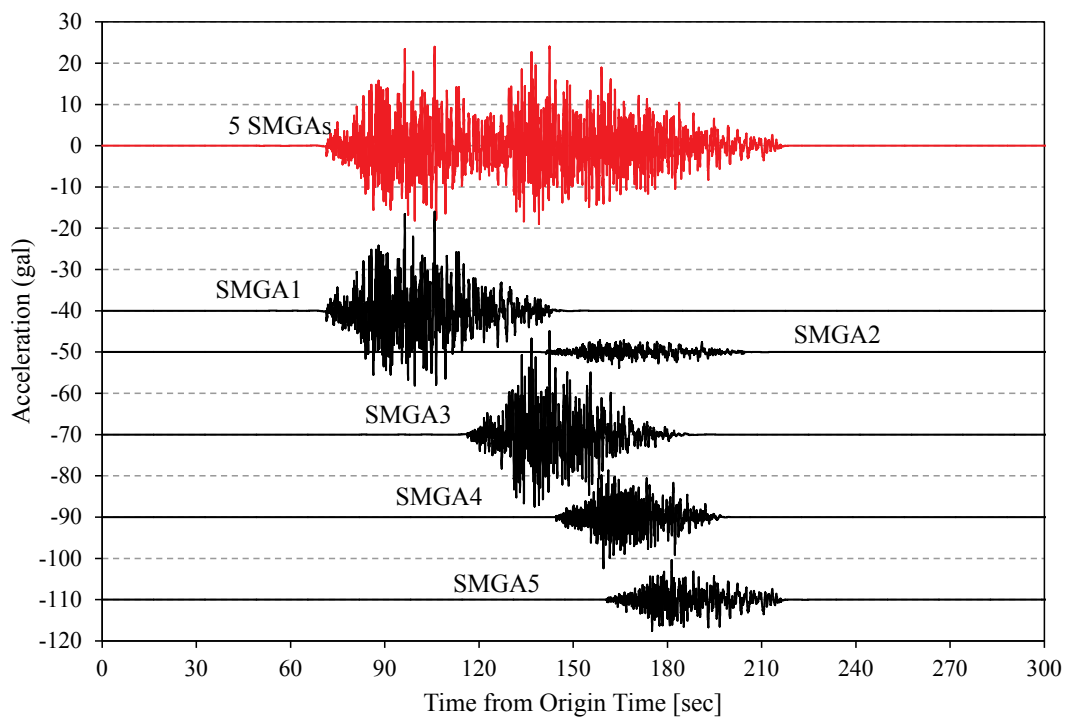


図 2-13: ダム基礎で観測された加速度波形のフーリエスペクトルと経験的グリーン関数法(各 SMGA に個別のグリーン関数を設定)を用いて合成した加速度波形のフーリエスペクトルの比較。(a) 上下流成分, (b) ダム軸成分。

(a) Upstream-downstream component



(b) Dam axis component

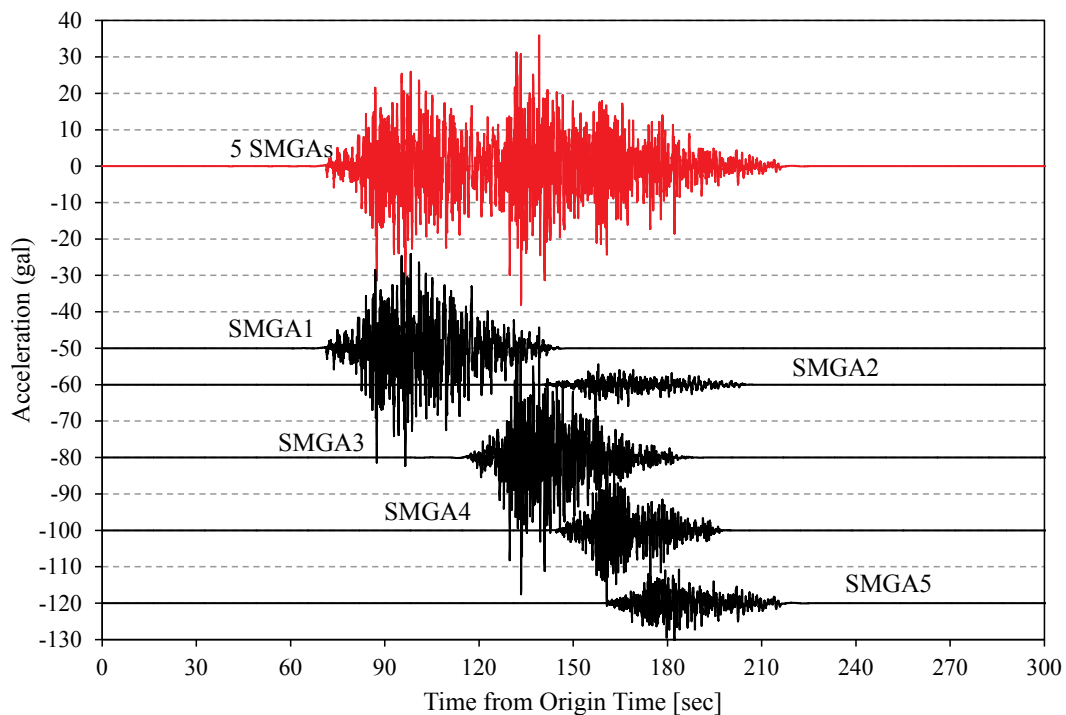


図 2-14: 加速度時刻歴波形を5つの SMGA に分解したもの。(a) 上下流成分, (b) ダム軸成分. 横軸時刻の基準時刻は地震発生時刻. 時刻歴波形は, 0.15 Hz より低い振動数成分をカットするフィルタ処理を行った.

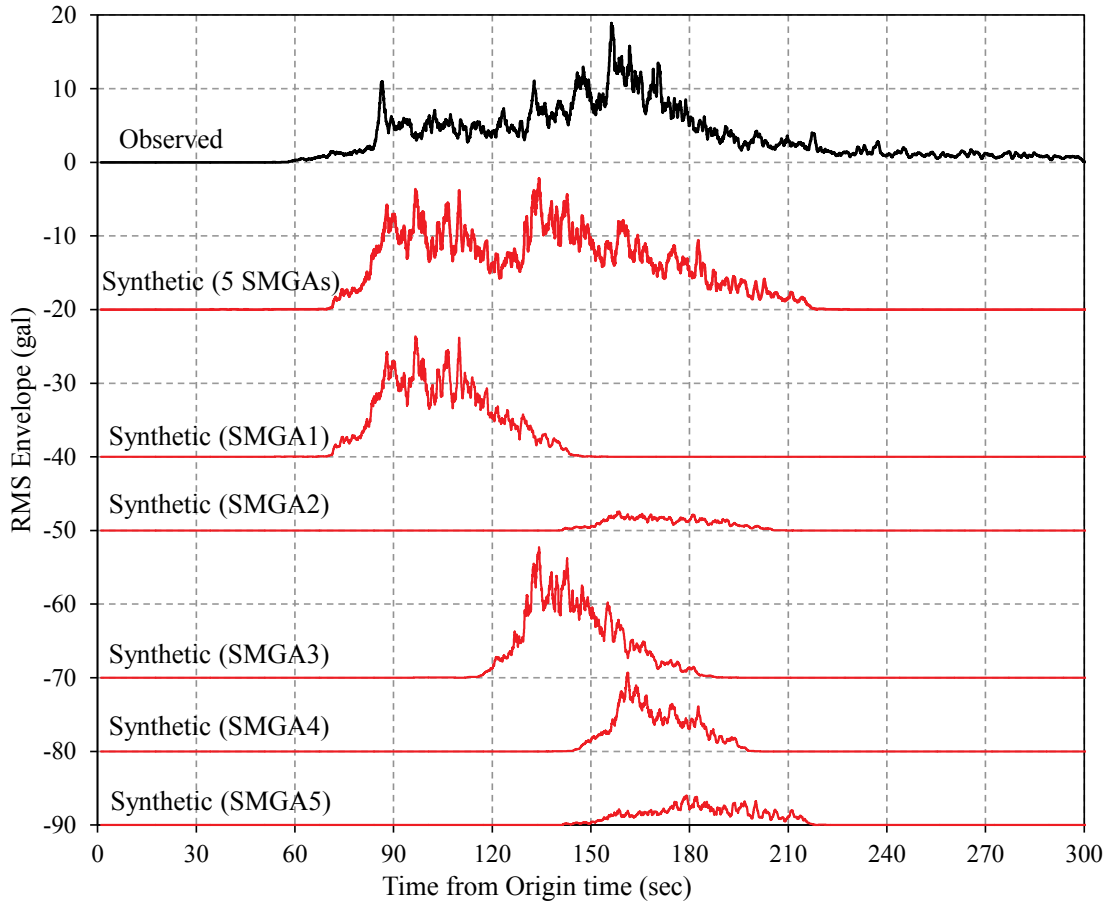


図 2-15: 水平 2 成分を合成した RMS エンベロープ波形の比較. 上から, 観測波形, 5 つの SMGA による合成波形, 各 SMGA による合成波形を示す.

与える影響は小さく, SMGA のみで地震動をほぼ説明できると言ってよい. フーリエスペクトルに関しては, 実測と近い結果となった.

図 2-12 に示した合成波形は 5 つの SMGA の影響を重ね合わせた結果であるが, これをそれぞれの SMGA からの地震動に分解したものを図 2-14 に示す. 120 秒頃までの前半部分は SMGA1 のみの寄与を受けており, 後半の地震動は SMGA3 と SMGA4 が主な地震動となっている. 対象サイトから最も遠い SMGA2 の影響はこのサイトではほとんど現れていない. 観測波形と各 SMGA の関係をさらに詳しく見るために, 水平 2 成分の RMS エンベロープ波形 (図 2-15) で比較を行う. これは, 水平 2 成分の加速度値をベクトル合成した時の振幅を計算した後に 1 秒間 (100 サンプル) の移動平均をとったものである. 観測波形のエンベロープでは, 86 秒頃・132 秒頃・147 秒頃・156 秒頃の 4 度, ピークがみられる. 1 つ目の 86 秒頃のピークは SMGA1 に相当し, 2 つ目の 132 秒頃のピークと 3 つ目の 147 秒頃のピークは SMGA3 に相当し, 4 つ目の 156 秒頃のピークは SMGA4 に相当していることが分かる. ピークの高さについては実測と異なるものの, ピークのタイミングは再現できている.

最大加速度と SMGA の関係について考察する. 観測波形のエンベロープが最大値をとるのは 156 秒頃である. この時間帯は SMGA3 と SMGA4 の影響が重なっている. SMGA3 と SMGA4 の破壊開始時刻は 40 秒程度離れている (表 2-3) が, 対象ダムサイトにおける到達時間差は 25 秒程度に

縮まっている。この差は、SMGA と対象ダムサイトとの位置関係（断層内の破壊伝播が対象ダムサイトに近づく方向に進行）によるものである。SMGA2・SMGA5 については、破壊伝播が対象ダムサイトから離れる方向となるため、それぞれ SMGA1・SMGA4 との時間差が破壊開始時間差より大きくなり、他の SMGA との重なりが小さくなる結果となった。

2.3.6 経験的グリーン関数を複数設定した効果

ここで、上記波形合成では各 SMGA に対して適当なグリーン関数として 3 つの中小地震を選択したが、経験的グリーン関数を複数設定した効果について検討するために全ての SMGA に対して共通に EGF-B をグリーン関数として波形合成を行った結果と比較する。各 SMGA の断層領域の長さ・幅・くい違い量が中小地震の整数倍となるよう微調整を行った断層パラメータを表 2-5 に示し、合成した加速度時刻歴波形（ハイパスフィルタにより 0.15 Hz より低い振動数帯域をカットしたもの）とフーリエスペクトル（バンド幅 0.05 Hz の Parzen Window を適用）をそれぞれ図 2-16・図 2-17 に示す。表 2-5 の断層パラメータにおいて、表 2-3 と異なる部分には下線を引いている。SMGA3 と SMGA4 については計算条件を変更していないため、最大加速度については上下流成分で 24 gal、ダム軸成分で 39 gal と変化はほとんどなかった。時刻歴波形の形状については、前半の地震動がかなり小さくなった。最も違いが現れたのがフーリエスペクトルである。3 つのグリーン関数を用いた場合（図 2-13）は、上下流成分で 0.36 Hz と 1.0 Hz 付近のピーク、1.8 Hz 付近の落ち込みの特徴が再現できているのに対し、図 2-17 に示す共通のグリーン関数を用いた場合は 0.36 Hz が実測とは逆に大きく落ち込んでおり再現できていない。ダム軸成分については、3 つのグリーン関数を用いた場合でも上下流成分と比べるとスペクトル形状を説明できていない部分があるが、共通のグリーン関数を用いた場合にはさらにそのずれが大きくなっている。1 Hz より高い振動数については、両手法の結果に大きな差は出ていないが、低振動数側で大きく差が現れている。これは、図 2-10 に示すグリーン関数に用いた加速度波形のフーリエスペクトルの違いで説明できる。グリーン関数のスペクトル形状について、1 Hz より高い振動数では非常に近いのに対し、0.3 Hz 付近のスペクトル強度はそれぞれ大きく異なる。EGF-A や EGF-C は、EGF-B に比べて低い振動数の成分をより多く含んでいる。従って、EGF-A・EGF-C を使っていた SMGA に対して EGF-B に変えると低振動数成分が減少することとなる。

表 2-5: 共通の経験的グリーン関数で波形合成を行った際に使用した断層パラメータ。

| | SMGA1 | SMGA2 | SMGA3 | SMGA4 | SMGA5 |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|
| L (km) | 55.2 | 36.8 | 92.0 | 36.8 | <u>36.8</u> |
| W (km) | 36.8 | 36.8 | 55.2 | 36.8 | <u>36.8</u> |
| $N_L \times N_w \times L_D$ | <u>6</u> × <u>4</u> × <u>14</u> | <u>4</u> × <u>4</u> × <u>6</u> | 10 × 6 × 11 | 4 × 4 × 4 | <u>4</u> × <u>4</u> × <u>3</u> |
| M0 (Nm) | 2.29E+21 | 6.56E+20 | 4.51E+21 | 4.37E+20 | 3.27E+20 |
| Stress drop (MPa) | 39.9 | 23.4 | 39.7 | 16.3 | 25.9 |
| Delay time from origin time (sec) | 15.64 | 66.42 | 68.41 | 109.71 | 118.17 |
| Rise time (sec) | 3.3 | 3.3 | 4.9 | 3.3 | <u>3.3</u> |
| EGF | <u>EGF-B</u> | <u>EGF-B</u> | EGF-B | EGF-B | <u>EGF-B</u> |

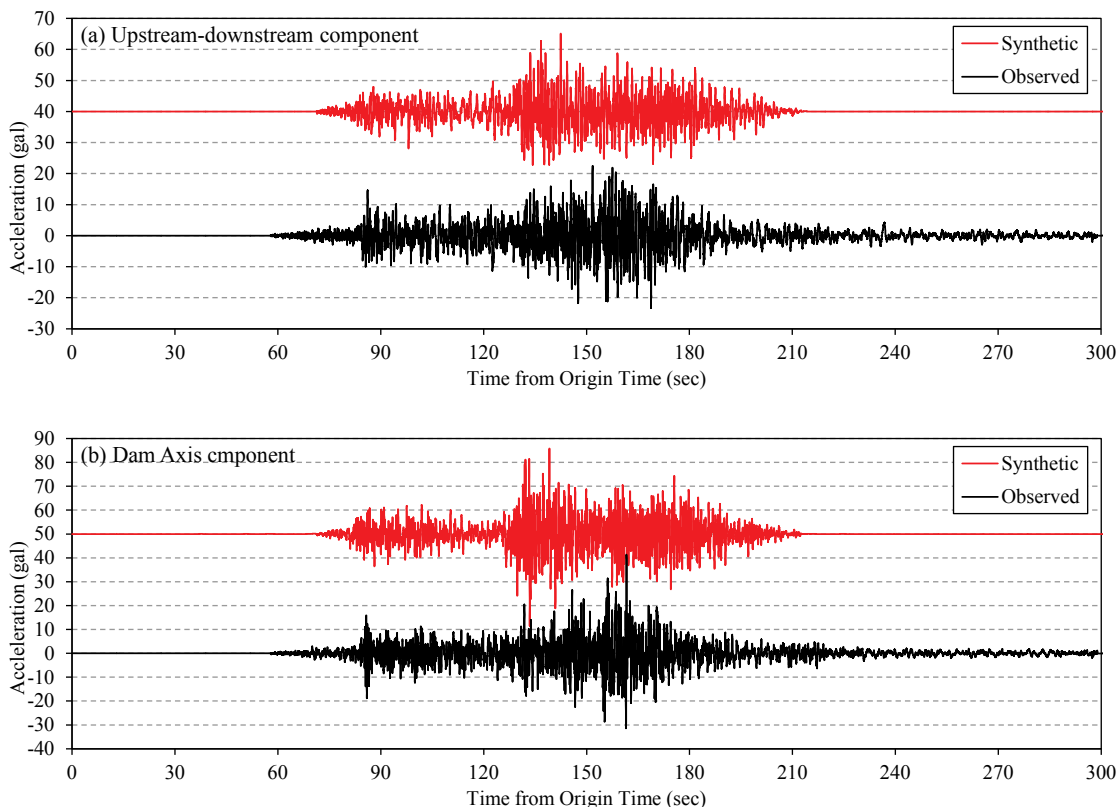


図 2-16: ダム基礎で観測された加速度時刻歴波形と経験的グリーン関数法(全ての SMGA に共通のグリーン関数を設定)を用いて合成した加速度時刻歴波形の比較. (a) 上下流成分, (b) ダム軸成分. 横軸時刻の基準時刻は地震発生時刻. 時刻歴波形は, 0.15 Hz より低い振動数成分をカットするフィルタ処理を行った.

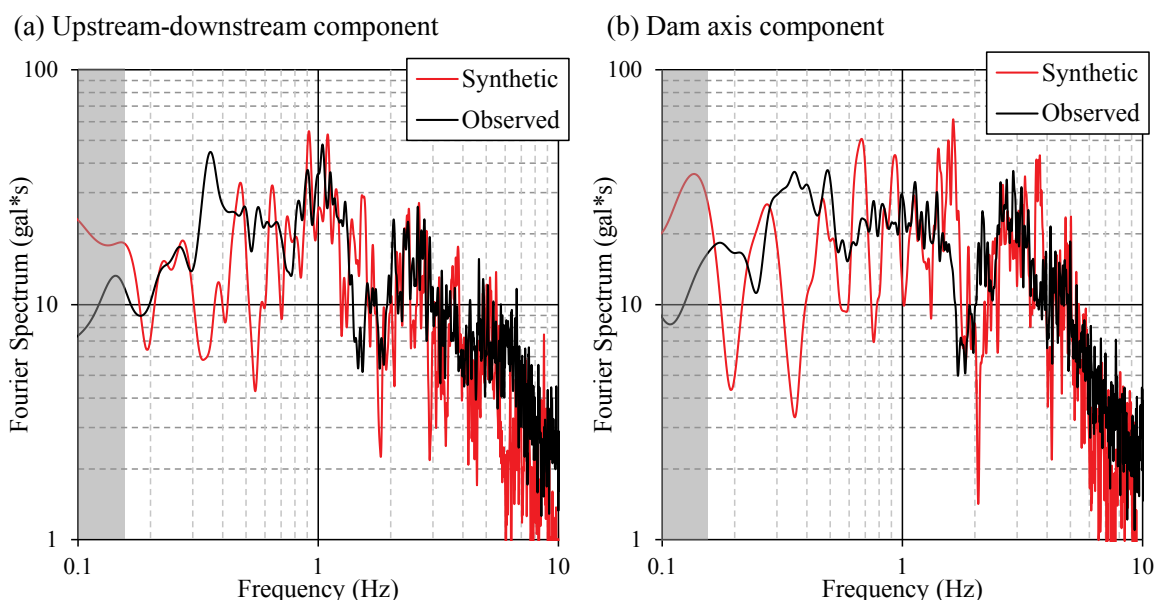


図 2-17: ダム基礎で観測された加速度波形のフーリエスペクトルと経験的グリーン関数法(全ての SMGA に共通のグリーン関数を設定)を用いて合成した加速度波形のフーリエスペクトルの比較. (a) 上下流成分, (b) ダム軸成分.

2.4 特徴的パルスの再現

2.4.1 観測波における特徴的パルス

前節において、観測波形のエンベロープ中に現れる 156 秒頃の最も大きなピークが再現できていなかった。前節では 0.15 ~ 10 Hz の広い振動数帯域を対象としていたが、本節では 0.2 ~ 1 Hz に限定して検討を行う。

野津(2012)など^{3), 40)}によれば、この地震の 0.2 ~ 1 Hz の帯域速度波形に注目すると、震源域に近い太平洋岸の堆積層の影響の小さい観測点では、パルス状の地震波が明確に現れている。前節で使用了ような一辺が数十 km 程度の SMGA より、一辺数 km 程度の破壊領域 (Strong-motion Pulse Generation Area, 以下 SPGA) を設定したほうがパルス状の地震波を再現できる。本節では、0.2 ~ 1 Hz 帯域の速度波形の再現から、ピーク値時刻の説明を試みる。

まず、対象ダムサイトの観測記録と前節での合成波形、最寄りの KiK-net 観測点の観測波形で太平洋岸の堆積層の影響の小さい観測点のようなパルス状の地震波が現れているか調べた。図 2-18 に図 2-12 で示したダムサイトにおける観測記録・合成波形を一回積分して速度に変換し、0.2 ~ 1 Hz のみを通すバンドパスフィルタ処理をした波形を、図 2-19 に KiK-net 下郷観測点の地中記録を同様に 0.2 ~ 1 Hz の速度波形にしたものを示す。ダムサイト・KiK-net 下郷観測点の観測記録に注目

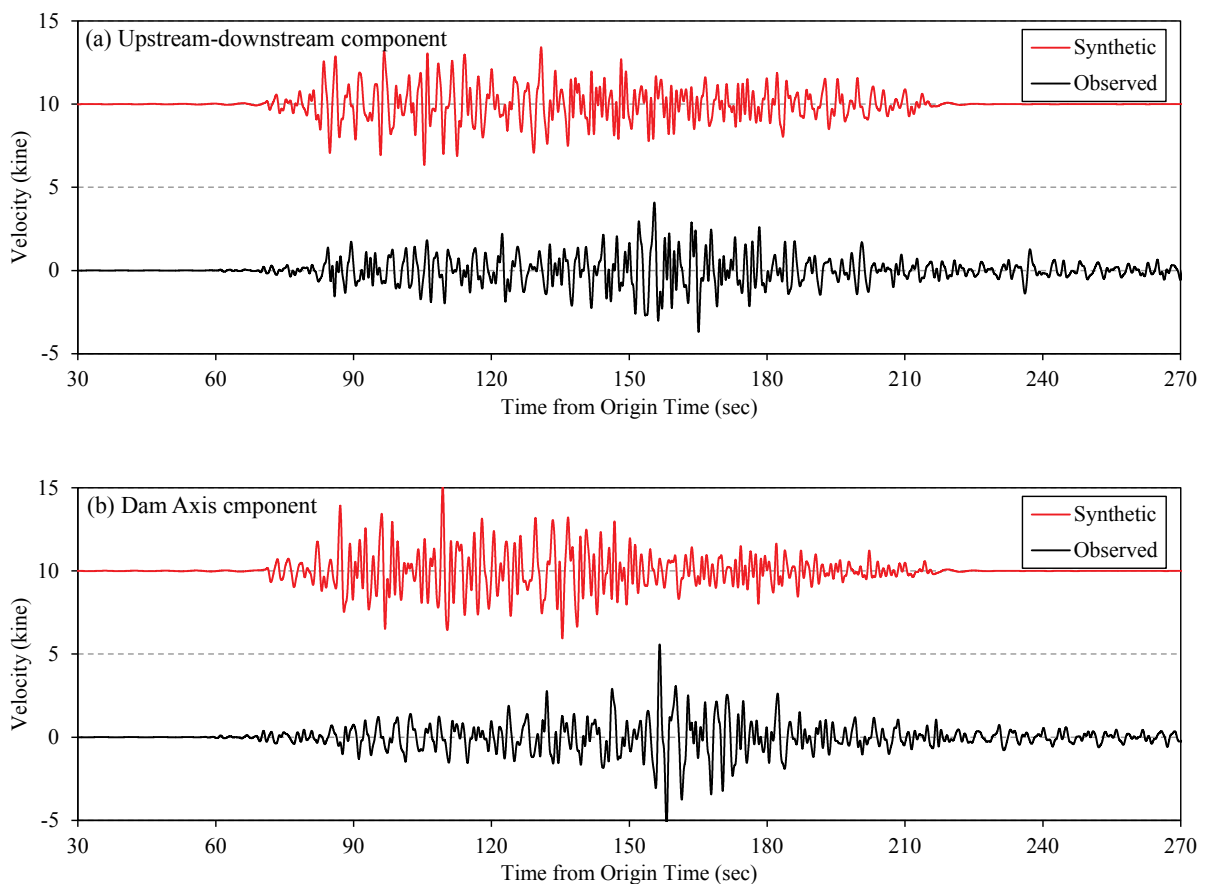


図 2-18: 0.2 - 1 Hz の速度波形に変換したダム基礎で観測・合成された時刻歴波形. (a) 上下流成分, (b) ダム軸成分. 横軸の基準時刻は地震発生時刻.

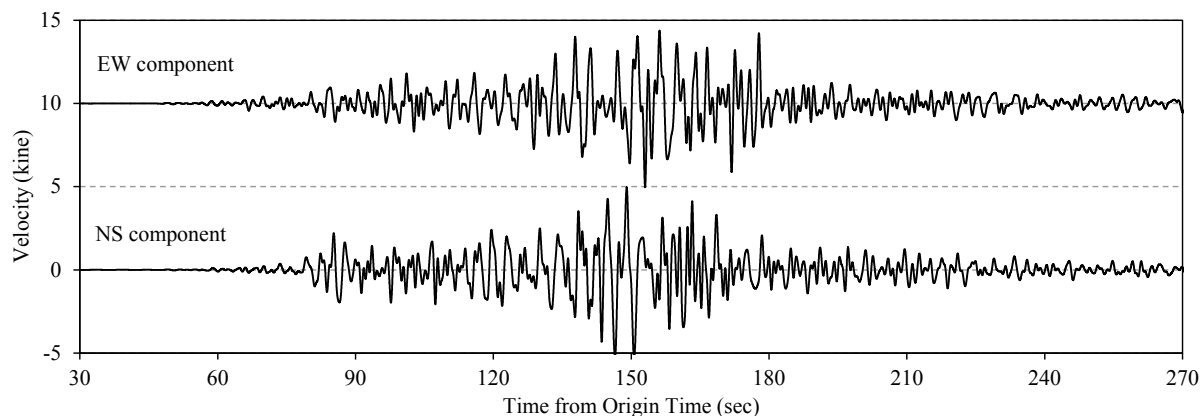


図 2-19: 0.2 - 1 Hz の速度波形に変換した KiK-net 下郷観測点 (FKSH05) の地中 (GL-105 m) における時刻歴波形. 横軸の基準時刻は地震発生時刻.

すると、いずれも 156 秒頃に振幅の大きなパルスが現れている。これは前節で求めたエンベロープ (図 2-15) にも現れていたが、速度波形では前 3 つのピークは明瞭ではなくなっている。これは、前 3 つのピークは 1 Hz より高い振動数成分によるもので、1 Hz より低い振動数成分を多く含んでいないことを示す。一方、加速度が最大値をとる付近のピークは 0.2 ~ 1 Hz 成分を多く含んでいる。合成波形では、150 秒より前の前半部分にパルスが現れており、後半部分に現れないという観測結果と逆の結果となっている。対象ダムサイトと最寄りの KiK-net 観測点で見られるパルスは、野津・若井(2012)⁴⁰⁾に示されているほど継続時間数秒の明瞭なものではない。

2.4.2 統計的グリーン関数法

0.2 ~ 1 Hz の速度波形の再現のため、統計的グリーン関数法を用いた。統計的グリーン関数法は、前節で使用した経験的グリーン関数とともに「半経験的手法」に分類される地震動作成手法である。経験的グリーン関数法では、グリーン関数として余震などの中小地震の地震動を用いるが、統計的グリーン関数法では、震源モデルから震源特性スペクトルを与える部分が異なり、重ね合わせ計算は経験的グリーン関数法と同様である。ここで前節とは異なり経験的グリーン関数法を用いなかったのは、前節で設定した経験的グリーン関数として用いた中小地震で設定した断層サイズが 10 km を超えており、0.2 ~ 1 Hz を再現する一辺数 km の SPGA よりすでに大きく、適用ができないためである。

統計的グリーン関数法では、中小地震にあたる領域からの地震動のフーリエ変換を

$$\tilde{u}(f) = S(f) \cdot R(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad \text{式 2-10}$$

で与える。ここで、

$\tilde{u}(f)$: 統計的グリーン関数のフーリエ変換 (複素数)

$S(f)$: 震源スペクトル (実数)

$R(f)$: 伝播経路特性 (実数)

$G(f)$: 地震基盤～計算対象までのサイト増幅特性 (実数)

$O(f)$: サイトで得られた中小地震記録のフーリエ変換 (複素数)

表 2-6: 震源スペクトル式・伝播経路特性式で使用する変数.

| 変数 | 単位 | 意味 |
|------------------|-------------------|----------------------------|
| $R_{\theta\phi}$ | — | ラディエーションパターン (震源放射特性) |
| FS | — | 自由表面における増幅の効果 |
| $PRTITN$ | — | 地震のエネルギーが水平方向の 2 成分に分散する効果 |
| M_{0e} | Nm | 小地震の地震モーメント |
| ρ | kg/m ³ | 地震基盤における媒質の密度 |
| V_s | m/s | 地震基盤における媒質の S 波速度 |
| f | Hz | 振動数 |
| f_c | Hz | コーナー振動数 |
| f_{max} | Hz | 高振動数遮断振動数 |
| r | m | 震源距離 |
| Q | — | 伝播経路における Q 値 |

である. 震源スペクトル・伝播特性について, 具体的には次式で与えられる³¹⁾.

$$S(f) = R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRTITN \cdot \frac{M_0}{4\pi\rho V_s^3} \cdot \frac{(2\pi f)^2}{1+(f/f_c)^2} \cdot \frac{1}{1+(f/f_{max})^s} \quad \text{式 2-11}$$

$$R(f) = \frac{1}{r} \cdot \exp\left(-\frac{\pi f r}{Q V_s}\right) \quad \text{式 2-12}$$

これらの式で使われている変数の意味は, 表 2-6 の通りである. 式 2-11 の右辺最終項を除いた部分は ω^{-2} モデル⁴¹⁾で, 震源から放射される地震波の加速度フーリエ振幅スペクトルを表している. 式 2-12 の右辺第一項は震源から球面状に広がる実体波の幾何減衰を, 第二項は非弾性減衰を示す.

式 2-11 と式 2-12 はいずれも実数であり, 振幅のみを考慮し, 位相の情報は含まれない. 位相の評価は $G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p}$ で示されるサイト特性部分のみで行っている. 本来位相評価としての地震動の

群遅延時間は,

$$t_{gr}^u(f) = t_{gr}^S(f) + t_{gr}^P(f) + t_{gr}^G(f) \quad \text{式 2-13}$$

で与えられる. ここで添字 u はサイトにおいて実際に観測される地震動を, 添字 S は震源特性を, 添字 P は伝播経路特性を, 添字 G はサイト特性を示す. 古和田他(1998)⁴²⁾は, 規模と震源距離が十分に小さな地震が対象サイトで観測されている場合, その記録の群遅延時間は式 2-13 の右辺第三

項を表現していると考え, このことを利用した強震動評価手法を考案している. $O(f)/|O(f)|_p$ は中小地震記録のフーリエ変換の振幅を 1 に調整したものであるが, 完全に 1 にしてしまうと因果律を満足しない³⁹⁾ため, $|O(f)|$ に Parzen Window をかける処理を行い (これをと $|O(f)|_p$ する), フーリ

エ振幅スペクトルの細かい山谷 (リップル) を残す. こうすることにより, 因果律を有する (地震波到達前にノイズが含まれない) 波形を生成するために必要な, 近接した振動数成分の関係が失われない. 地震基盤～計算対象までのサイト増幅特性 $G(f)$ については, このサイトの特性を評価し

ていないため、全振動数帯において1とした。ダム基礎のため、振動数による特性の違いは大きくないと考えられる。

式2-10で作成した中小地震にあたる領域からの地震動を式2-1から式2-3を使って重ね合わせるにより、大地震の加速度時刻歴波形を生成する。

2.4.3 波形合成計算

波形合成のための震源モデルは、野津・若井(2012)⁴⁰)を用いる。震源パラメータを表2-7に示し、各SPGAの位置を図2-20に示す。ここで、グリーン関数の位相特性を決めるために用いる中小地震記録を決める必要がある。野津・若井(2012)⁴⁰)において採用している中小地震と同じ地震記録がダムサイトで得られているものについては、文献と同じものを選んだ。具体的には、SPGA1・SPGA2・SPGA3については表2-3のEvent-8 (EGF-A)を、SPGA9についてはEvent-7 (EGF-C)とした。その他のSPGAについては、震源位置の近いものを選んだ。SPGA4にはEvent-8を、SPGA5・SPGA6・SPGA7にはEvent-6 (EGF-B)を、SPGA8にはEvent-7を選んだ。

表 2-7: 各 SPGA における断層パラメータ.

| | SPGA1 | SPGA2 | SPGA3 | SPGA4 | SPGA5 |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| L (km) | 3.0 | 4.0 | 4.0 | 3.5 | 3.0 |
| W (km) | 2.0 | 3.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
| M_0 (Nm) | 8.00E+18 | 8.00E+18 | 4.00E+18 | 2.10E+19 | 3.00E+18 |
| Slip (m) | 28.3 | 14.1 | 10.6 | 42.4 | 5.3 |
| Delay time from origin time (sec) | 25.38 | 28.78 | 75.28 | 68.18 | 98.98 |
| Rise time (sec) | 0.17 | 0.25 | 0.17 | 0.25 | 0.33 |
| EQ for Phase Effect | Event-8 | Event-8 | Event-8 | Event-8 | Event-6 |
| Continue | | | | | |
| | SPGA6 | SPGA7 | SPGA8 | SPGA9 | |
| L (km) | 3.0 | 6.0 | 8.0 | 7.0 | |
| W (km) | 4.0 | 2.0 | 3.0 | 7.0 | |
| M_0 (Nm) | 3.00E+18 | 5.00E+18 | 9.00E+18 | 2.00E+19 | |
| Slip (m) | 5.3 | 8.8 | 8.0 | 8.7 | |
| Delay time from origin time (sec) | 106.28 | 116.88 | 127.68 | 132.78 | |
| Rise time (sec) | 0.17 | 0.25 | 0.17 | 0.25 | |
| EQ for Phase Effect | Event-6 | Event-6 | Event-7 | Event-7 | |

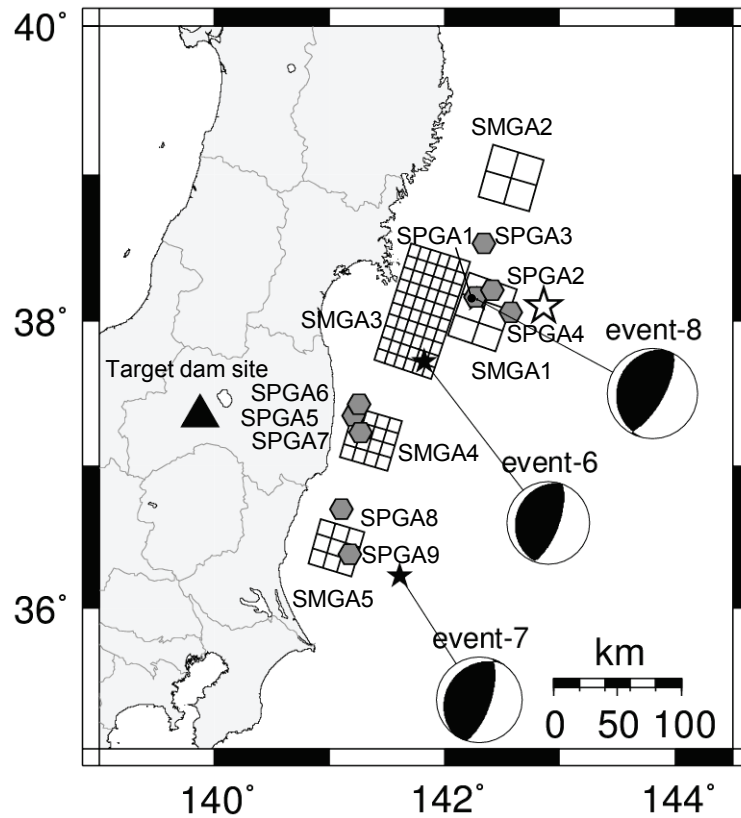


図 2-20: SPGA 位置と位相評価用に使用した中小地震の震央位置.

2.4.4 波形合成結果

前項で説明した方法で波形合成した結果を図 2-21 に示す. 0.2~1Hz の速度時刻歴波形について, 全ての SPGA を合成したものと各 SPGA に分離したものを示した. 本計算ではサイト増幅特性の評価を行っていないため, 合成波形の振幅・スペクトル形状については議論しない. 速度波形形状とパルス時刻について注目する. 速度波形形状については, 120 秒頃までの前半より 150 秒頃以降の後半の振幅が大きくなる特徴が説明できている. 156 秒頃のパルスについては, SPGA4・SPGA5・SPGA6・SPGA7 が重なり合った時刻である. 対象ダムサイトや最寄りの KiK-net 観測点では, 野津 (2012)³⁾ が示しているほど継続時間数秒の明瞭なパルスが見えておらず, 30 秒程度の長さにとまっているのは, SPGA からの距離が沿岸部の観測点より遠いことに加えて, 福島沖の SPGA5・SPGA6・SPGA7 と同時刻帯に宮城沖の SPGA4 の地震動が到達しており, これらが重なり合っているためであると考えられる.

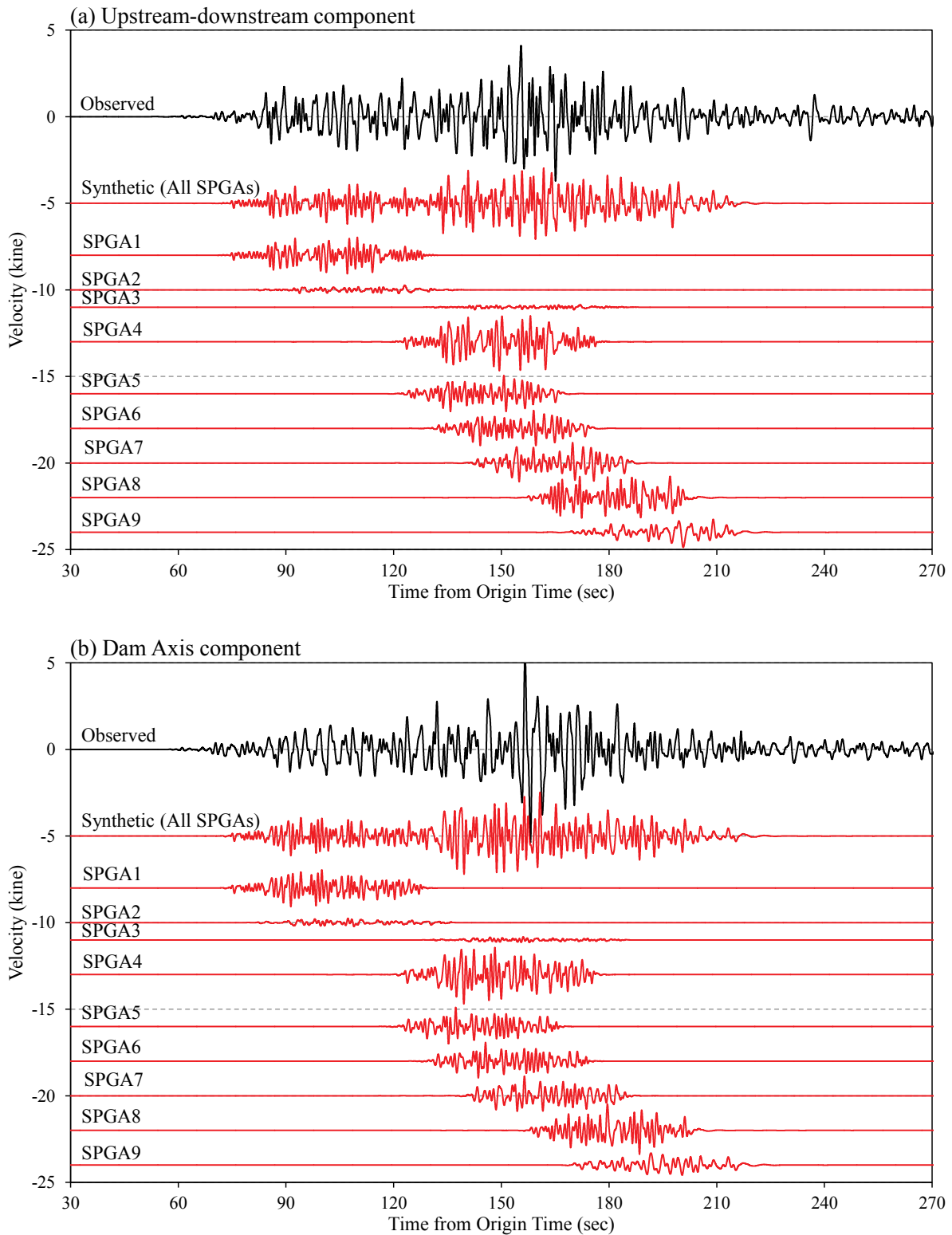


図 2-21: 統計的グリーン関数法で合成した速度(0.2 - 1 Hz)時刻歴波形. (a) 上下流成分, (b) ダム軸成分. SPGA ごとに分離した速度波形も示す.

2.5 まとめ

平成 23 年東北地方太平洋沖地震において福島県にあるダムサイトで得られた地震動記録を、経験的グリーン関数法・統計的グリーン関数法を用いて再現した。ダム基礎で得られた地震動は KiK-net 観測地点の地中における地震動と類似した特徴を持ち、表層近くの堆積層の影響をほとんど受けていない。

一辺が数 10 km の大きさの SMGA モデルでは、5 つの SMGA に対して 3 つのグリーン関数を適用したところ、PGA とフーリエスペクトルについては観測結果を良く説明することができた。全ての SMGA に対して 1 つのグリーン関数を適用した場合との比較では、3 つのグリーン関数を使用した方が観測結果をより良く再現した。またエンベロープの比較では、観測波形のピークに対してそれぞれ対応する SMGA が存在しており、各 SMGA からの地震動がどのように全体の観測波形を形作ったのか分かった。観測波形後半の加速度が最大となる時刻は、宮城沖の SMGA3 と福島沖の SMGA4 の地震動が重なり合っていることが分かった。

SMGA モデルでは加速度が最大となる時刻の再現ができなかったため、一辺数 km の大きさの SPGA モデルで統計的グリーン関数法を用いて波形合成を行ったところ、観測波形と同様に後半の振幅が前半より大きくなった。振幅が最大となる時刻付近は、宮城沖の SPGA4 と福島沖の SPGA5・6・7 の地震動が重なり合っており、SMGA モデルと同様 SMGA・SPGA と対象ダムサイトの位置関係が加速度の最大時刻を決めたことが分かった。

参考文献

- 1) Ide, S., Baltay, A. and Beroza, G. C.: Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, **332**, 6036, 1426 – 1429, 2011.
- 2) Ammon, C. J., Lay, T., Kanamori, H. and Cleveland, M.: A rupture model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63** (7), 693 – 696, 2011.
- 3) 野津厚：2011 年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案，*日本地震工学会論文集*, **12** (2), 21 – 40, 2012.
- 4) Furumura, T., Takemura, S., Noguchi, S., Takemoto, T., Maeda, T., Iwai, K. and Padhy, S.: Strong ground motions from the 2011 off-the Pacific-Coast-of-Tohoku, Japan ($M_w = 9.0$) earthquake obtained from a dense nationwide seismic network, *Landslides*, **8**, 333 – 338, 2011.
- 5) Kurahashi, S. and Irikura, K.: Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63** (7), 571 – 576, 2011.
- 6) 川辺秀憲，釜江克宏，上林宏敏：2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル，*日本地震学会講演予稿集*, B22-05, 2011.
- 7) Nishimura, T., Munekane, H. and Yarai, H.: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks observed by GEONET, *Earth Planets Space*, **63** (7), 631 – 636, 2011.
- 8) Ishii, M., Shearer, P. M., Houston, H. and Vidale, J. E.: Extent, duration and speed of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake imaged by the Hi-Net array, *Nature*, **435**, 933 – 936, 2005.
- 9) Wang, D., Mori, J. and Uchide, T.: Supershear rupture on multiple faults for the M_w 8.6 Off Northern Sumatra, Indonesia earthquake of April 11, 2012, *Geophysical Research Letters*, **39**, L21307, 2012.
- 10) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, Y.: New strong-motion observation network: KiK-net,

EOS Transactions American Geophysical Union, Fall Meeting Suppl., Abstract S71A-05, 2000.

- 11) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceeding of 7th Japan Earthquake Symposium*, 151 – 156, 1986.
- 12) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長：地震のスケーリング則に基づいた地震時の強震動予測—統計的波形合成法による予測—, *日本建築学会構造系論文報告集*, **430**, 1–9, 1991.
- 13) 上野寛, 畠山信一, 明田川保, 舟崎淳, 浜田信生：気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, *駿震時報*, **65**, 123 – 134, 2002.
- 14) 佐藤信光, 曾田英揮, 太田垣晃一郎：実測地震記録による既設ダム堤体の動的特性および物性値の推定と適用, *平成24年度水資源機構技術研究発表会*, 2012.
- 15) 国土交通省：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針（改訂素案）・同解説, 2009.
- 16) 松本徳久, 佐藤信光, 佐々木隆：東北地方太平洋沖地震のダムへの影響（その1）—地震動の特徴—, *ダム工学*, **22** (1), 28 – 36, 2012.
- 17) 日本建築学会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の作成法, 日本建築学会, 163pp., 2009.
- 18) 山中浩明, 武村雅之, 岩田知孝, 香川敬生, 佐藤俊明：地震の揺れを科学する 見えてきた強震動の姿, 東京大学出版, 151 pp., 2006.
- 19) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会（第11回）とりまとめ資料（本文）, 2001.
- 20) 国土交通省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2007.
- 21) 野津厚：経験的サイト増幅・位相特性を用いた東海地方における強震動評価事例, *海溝型巨大地震を考える—広帯域強震動の予測—シンポジウム論文集*, 土木学会・日本建築学会, 29 – 34, 2005.
- 22) 池田隆明, 釜江克宏, 三輪滋, 入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源モデル化と強震動シミュレーション, *日本建築学会構造系論文集*, **561**, 37 – 45, 2002.
- 23) Irikura, K. and Kamae, K.: Estimation of strong ground motion in broad-frequency based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique, *Annali Di Geofisica*, **XXXVII** (6), 1721 – 1743, 1994.
- 24) 久田嘉章：強震動予測における震源のモデル化, *第27回地盤震動シンポジウム*, 日本建築学会, 5 – 16, 1999.
- 25) Irikura, K. and Kurahashi, S.: Strong ground motions during the 2011 Pacific coast of Tohoku, Japan, earthquake, http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/One-year-after-the-2011-Tohoku_irikura_revised.pdf, 2013年5月31日閲覧.
- 26) 気象庁：地震・火山月報（カタログ編）CD-ROM.
- 27) Okada, Y., Kasahara, K., Hori, S., Obara, K., Sekiguchi, S., Fujiwara, H. and Yamamoto, A.: Recent progress of seismic observation networks in Japan –Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net–, *Earth Planets Space*, **56** (8), xv – xxviii, 2004.
- 28) Asano, Y., Saito, T., Ito, Y., Shiomi, K., Hirose, H., Matsumoto, T., Aoi, S., Hori, S. and Sekiguchi, S.: Spatial distribution and focal mechanisms of aftershocks of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63** (7), 669 – 673, 2011.
- 29) Ohta, Y., Miura, S., Ohzono, M., Kita, S., Iinuma, T., Demachi, T., Tachibana, K., Nakayama, T., Hirahara, S., Suzuki, S., Sato, T., Uchida, N., Hasegawa, A. and Umino, N.: Large intraslab earthquake (2011 April 7, *M* 7.1) after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (*M* 9.0): Coseismic fault model based on the dense GPS network data, *Earth Planets Space*, **63** (12), 1207 – 1211, 2011.

-
- 30) 宇津徳治：地震学第3版，共立出版，376 pp.，2001.
 - 31) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **73** (6), 1865 – 1894, 1983.
 - 32) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **75** (26), 4997 – 5009, 1970.
 - 33) Brune, J. N.: Correction, *Journal of Geophysical Research*, **76** (20), 5002, 1971.
 - 34) Kamae, K.: Source modeling of the 2005 off-shore Miyagi prefecture, Japan, earthquake ($M_{JMA} = 7.2$) using the empirical Green's function method, *Earth Planets Space*, **58** (12), 1561 – 1566, 2006.
 - 35) Suzuki, W. and Iwata, T.: Source model of the 2005 Miyagi-Oki, Japan, earthquake estimated from broadband strong motions, *Earth Planets Space*, **59** (11), 1155 – 1171, 2007.
 - 36) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society A*, **241**, 1226, 376 – 396, 1957.
 - 37) 片岡正次郎，日下部毅明，村越潤，田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究，*国土技術政策総合研究所研究報告*，第15号，2003.
 - 38) 川瀬博，松尾秀典：K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析，*日本地震工学会論文集*，**4** (1), 33 – 52, 2004.
 - 39) 野津厚，菅野高弘：経験的サイト増幅特性・位相特性を考慮した強震動評価手法－因果性と多重非線形効果に着目した改良－，*港湾空港技術研究所資料*，1173, 2008.
 - 40) 野津厚・若井淳：強震動を対象とした2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル，*港湾空港技術研究所報告*，**51** (1), 23 – 53, 2012.
 - 41) Aki, K.: Scaling law of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, **72**, 1217 – 1231, 1967.
 - 42) 古和田明，田居優，岩崎好規，入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価，*日本建築学会構造系論文集*，**514**, 97 – 104, 1998.
 - 43) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Transactions American Geophysical Union*, **79**, 579, 1998.

第3章 巨大地震時に発表される緊急地震速報の 課題と活用法

Chapter 3: Issues on Application of the Earthquake Early Warnings at Major Earthquakes

Abstract

平成 23 年東北地方太平洋沖地震とその後発生した余震に対して発表された緊急地震速報（警報・予報）では、以前から指摘はされていたがその影響についてあまり議論されていなかったいくつかの「限界」が現実問題となった。特に大規模な地震の規模推定精度の限界や複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合に誤報を発表したことは、緊急地震速報の信頼低下を招き、自動制御等に使う利用者にとって大きな問題となった。これらの問題に対してサービスを提供する予報業務許可事業者が実施した対策について述べる。また、高速道路を対象に地震発生時に被害が予測される箇所とその規模、優先的に点検を行うべき箇所の情報を提供し、直後対応の意思決定を支援するシステムのプロトタイプを製作した。実用化システムの設計にあたり、巨大地震への対応も考慮した設計を行った。

A lot of Earthquake Early Warning (EEW) announcements were issued to the public by Japan Meteorological Agency (JMA) during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0) and during its many aftershocks. What in the past had been only a theoretical or hypothetical problems became real ones at these earthquakes. The issues such as underestimation of the magnitude and seismic intensities at major earthquakes and false alarms when two earthquakes occurred close to one another in spatially and in temporally resulted in a decrease in credibility of the EEW. These were serious problems especially for users using the EEW for emergency automatic controls. This chapter reports the issues on application of the EEW, and introduces some countermeasures which a licensed business operator took against the problems after the major earthquake. A prototype of decision-making support system for the expressway company was developed so that the company could take initial response quickly to earthquake disasters. The system was designed to perform adequately for major earthquakes, estimating the damages by involving ground motion waveforms observed as well as calculating by seismic parameters of EEW.

3.1 はじめに

緊急地震速報は、一般に工場・交通期間における自動制御やオペレータを介した手動制御、集客施設での館内放送、テレビ・ラジオ・携帯電話での地震動警報の提供、事業者・家庭向けの地震動予報報知端末などを通じて、「大きな揺れが来る前に知らせる情報」として活用されている¹⁾。

2011年3月11日に発生した平成23年東北地方太平洋沖地震とその後の余震に対して発表された緊急地震速報（警報・予報）では、以前から指摘はされていたがその影響についてあまり議論されてこなかったいくつかの「限界」が現実問題となり、一時的に信頼の低下を招くこととなった。これらの課題は、これまでマグニチュード（ M ）7クラス以下の比較的頻度の多い地震では目立つことはなかったが、今回の地震で明らかになったものである。気象庁から発表される震源パラメータ（発生時刻・震央位置・震源の深さ・マグニチュード）の精度向上については、情報発信側である気象庁が改善を行うことになるが、それとは別に地震動予報のサービスを行う事業者が対応できる課題も存在する。

南海トラフにおける $M8$ を超える地震への対策として、緊急地震速報を活用した防災・減災対策が取り組まれているが、巨大地震発生時には東北地方太平洋沖地震で経験したものと類似の問題が生じることが予想される。そこで本章では、東北地方太平洋沖地震とその後の余震で明らかとなった緊急地震速報の課題について整理し、実際に地震動予報許可事業者が利用者に対して行った対応策を紹介する。許可事業者は、気象庁からの警報を伝達するのみではなく、ピンポイントの揺れの大きさの情報など付加価値を付けて情報提供する。そのため、緊急地震速報の特性を十分理解した上で独自の情報提供を行うことや、利用者へ利用方法のアドバイスをすることが可能である。

また、緊急地震速報を地震後最も早いタイミングで入手できる震源情報として活用する、地震直後対応のためのシステムの例として、高速道路を対象に、地震発生時に被害が予測される箇所とその規模、優先的に点検を行うべき箇所の情報を提供し、直後対応の意思決定を支援するシステムのプロトタイプを製作した。このシステムにとっても巨大地震時には緊急地震速報のみの情報では不十分であるため、東北地方太平洋沖地震での経験を実用化システムの設計に反映させることとした。

3.2 緊急地震速報の課題の整理

緊急地震速報の本運用開始前から指摘され、東北地方太平洋沖地震で大きな問題となった課題について整理する。図3-1に、平成17(2005)年11月17日に気象庁で開催された「緊急地震速報の本運用開始に係る検討会（第1回）」の資料4「緊急地震速報の概要（特徴と限界）」²⁾の抜粋に追記したものを示す。この中で、東北地方太平洋沖地震とその後の地震で発表された緊急地震速報で課題となったものが実線・破線で囲んだ3つである。(1)から(3)については、以下の項で具体的に説明する。(1)と(2)は本震の推計精度に関する課題、(3)は本震後の余震や各地で数多く発生した地震に関する課題である。これらの課題については、現在気象庁などにより改善が進められているものの、特に大規模な地震に対しては常につきまとうものであり、南海トラフ巨大地震など今後の $M8$ を超える大地震への対応を検討する際にも考慮すべきものである。

緊急地震速報の限界

(時間)

- ・ 情報を発表してから主要動(大きな揺れ)が到達するまでの時間は長い場合でも十数秒～数十秒
- ・ 震源に近い場所では、情報の提供が主要動(大きな揺れ)の到達に間に合わない

(誤報)

- ・ 1観測点のデータを使っている段階ではノイズにより情報を発表する可能性がある(事故、落雷、機器の障害)

(地震の規模等の推定の課題)

(1)

- ・ 特に大規模な地震に対する推定精度の限界

一 地下の断層の破壊の途中に情報を発表

2003年9月26日 十勝沖地震(M8.0) 約90kmの断層 約40秒で破壊

2005年8月16日 宮城県沖の地震(M7.2) 約60kmの断層 約20秒で破壊

- ・ 複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合に、別々の地震と認識できず、的確な情報を発表できないことがある

(3)

(震度推定の課題)

- ・ 震度推計に経験式を用いていることによる精度の限界

- ・ 表層の地盤における増幅予測の限界

(2)

図 3-1: 緊急地震速報の限界²⁾. 東北地方太平洋沖地震とそれ以降に課題となったものを枠で囲んだ。

3.2.1 特に大規模な地震に対する推定精度の限界

東北地方太平洋沖地震発生時に発表された緊急地震速報(予報)の第1報から最終報(第15報)までの震源パラメータと気象庁一元化処理震源リストに記載された震源パラメータを、表 3-1 に示す。震源位置については、第1報から比較的精度良く求まっている。一方 M については、断層破壊の進展とともに発表される M が大きくなり(図 3-2)、それに伴い予想最大震度も6弱まで大きくなっている。最終報では $M 8.1$ であった。この緊急地震速報(予報)を、震度7を観測した宮城県栗原市築館と震度5強を観測した東京都千代田区大手町で受信した場合のパソコン画面のイメージを図 3-3 に示す。星印が震央を示し、黒の円がP波、赤の円がS波の広がりを示している。また、画面左側には予測震度と主要動到達までの猶予時間が表示されている。このイメージは動画投稿サイト YouTube で動画として見ることができる(<http://www.youtube.com/user/quicknamazu/>)。携帯電話等でも伝えられる警報は第4報のタイミングで発表された。警報対象となったのは、宮城・岩手・福島・山形・秋田の各県であり、地震検知後60秒経過した場合には、最大予測震度が大きくなっても警報が更新されないという制限により、関東地方に警報が発表されることはなかった。東北地方太平洋沖地震後この制限は外されたが、制限がなければ第14報(最初の警報から約97秒後、地震検知後105秒後)で関東地方まで広範囲に警報対象となっていた(図 3-4)。このタイミングは、関東地方では主要動は到達しているもののまだ最大振幅が観測されるより前である。この地震における緊急地震速報(予報)最終報の発表は、地震発生から約140秒後であり、後に発表された震源時間関数³⁾と比較すると、まだ茨城県沖ですべりが継続している時間である。一方、その後に発表される震源情報についても、最初に発表されたのが $M 7.9$ 、約1時間後の発表で $M 8.4$ となり⁴⁾、その2時間後には $M 8.8$ ⁵⁾、2日後には $M 9.0$ に訂正⁶⁾されていることから、巨大地震に関

してこの課題は緊急地震速報限定のものではない。M 8.1 という最終報の値は、固有周期 6 秒の特性を持つ変位計の最大震幅から推定する変位振幅マグニチュードのほぼ上限値であり、モーメントマグニチュード(M_w) 8 以上では飽和すると言われている^{7),8)}。つまり特に大規模な地震では、発生直後の初動体制には M そのものの値より「相当大きな地震が発生した」という情報として扱うべきであると考える。

表 3-1: 東北地方太平洋沖地震時に発表された緊急地震速報(予報)の震源パラメータの推移と気象庁一元化処理震源リストの震源パラメータ。警報は予報第 4 報で発表され、その後は更新されなかった。

| 報数 | 発表時刻 | Origin Time | Latitude | Longitude | Depth (km) | M | 予測最大震度 |
|--------|------------|-------------|----------|-----------|------------|-----|--------|
| 1 | 14:46:45.6 | 14:46:19 | 38.2 | 142.7 | 10 | 4.3 | 震度 1 |
| 2 | 14:46:46.7 | 14:46:19 | 38.2 | 142.7 | 10 | 5.9 | 震度 3 |
| 3 | 14:46:47.7 | 14:46:19 | 38.2 | 142.7 | 10 | 6.8 | 震度 4 |
| 4 | 14:46:48.8 | 14:46:19 | 38.2 | 142.7 | 10 | 7.2 | 震度 5 弱 |
| 5 | 14:46:49.8 | 14:46:19 | 38.2 | 142.7 | 10 | 6.3 | 震度 4 |
| 6 | 14:46:50.9 | 14:46:19 | 38.2 | 142.7 | 10 | 6.6 | 震度 4 |
| 7 | 14:46:51.2 | 14:46:19 | 38.2 | 142.7 | 10 | 6.6 | 震度 4 |
| 8 | 14:46:56.1 | 14:46:17 | 38.1 | 142.9 | 10 | 7.2 | 震度 4 |
| 9 | 14:47:02.4 | 14:46:16 | 38.1 | 142.9 | 10 | 7.6 | 震度 5 弱 |
| 10 | 14:47:10.2 | 14:46:16 | 38.1 | 142.9 | 10 | 7.7 | 震度 5 弱 |
| 11 | 14:47:25.2 | 14:46:16 | 38.1 | 142.9 | 10 | 7.7 | 震度 5 弱 |
| 12 | 14:47:45.3 | 14:46:17 | 38.1 | 142.9 | 10 | 7.9 | 震度 5 強 |
| 13 | 14:48:05.2 | 14:46:17 | 38.1 | 142.9 | 10 | 8.0 | 震度 5 強 |
| 14 | 14:48:25.2 | 14:46:17 | 38.1 | 142.9 | 10 | 8.1 | 震度 6 弱 |
| 最終報 | 14:48:37.0 | 14:46:17 | 38.1 | 142.9 | 10 | 8.1 | 震度 6 弱 |
| 一元化リスト | | 14:46:18.12 | 38.103 | 142.861 | 23.7 | 9.0 | 震度 7 |

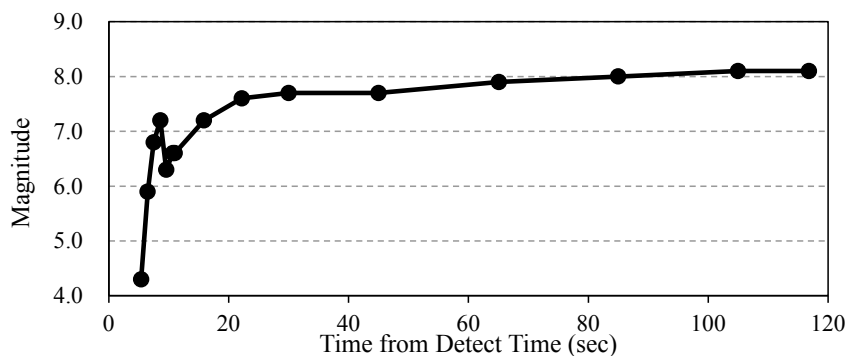


図 3-2: 東北地方太平洋沖地震時に発表された緊急地震速報(予報)のマグニチュード推移。横軸の基準は気象庁が地震波を検知した 14:46:40.2 としている。

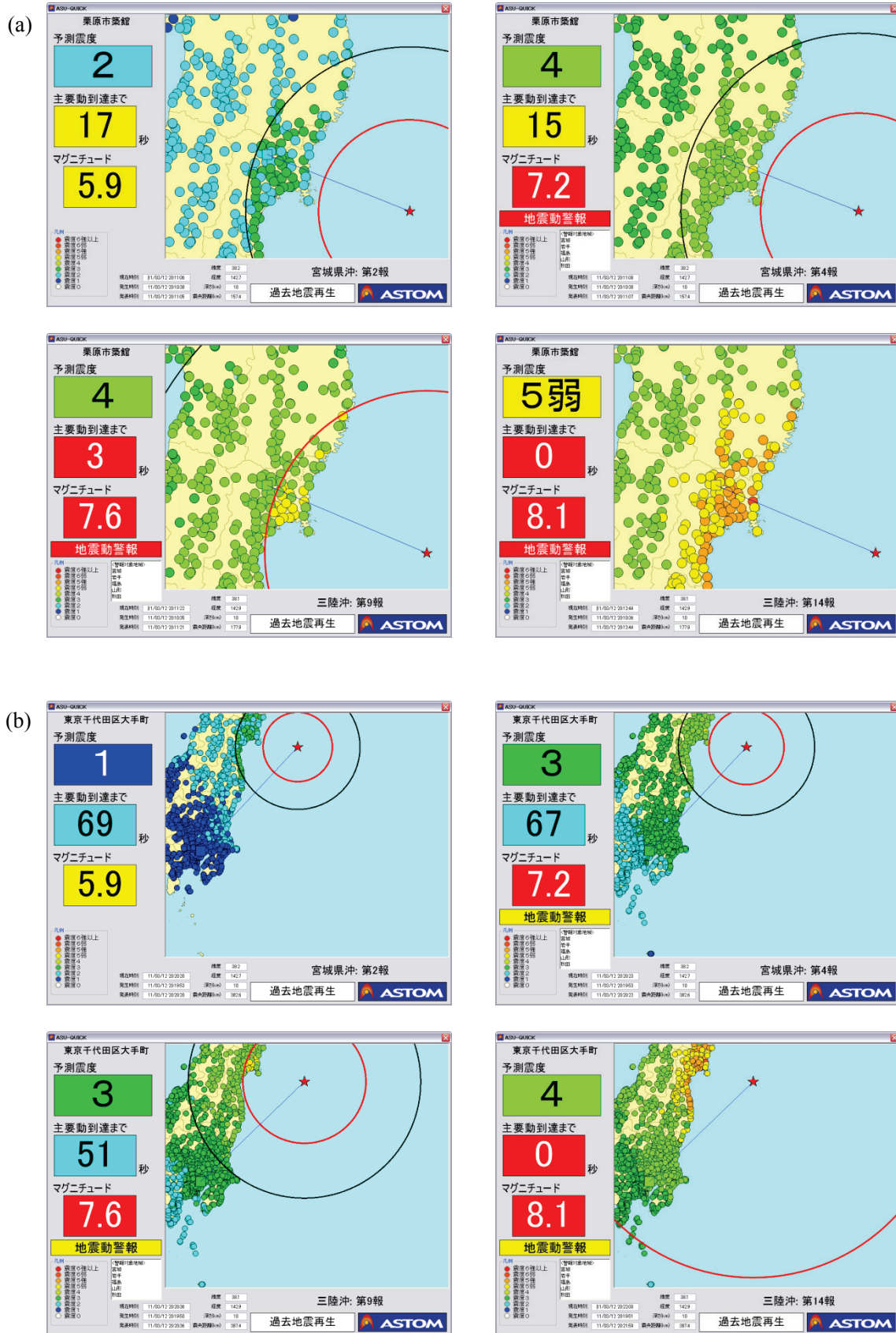


図 3-3: 東北地方太平洋沖地震における緊急地震速報(予報)の第2報・第4報・第9報・第14報受信時のイメージ。(a) 宮城県栗原市築館(震度7を観測), (b) 東京都千代田区大手町(震度5強を観測)。

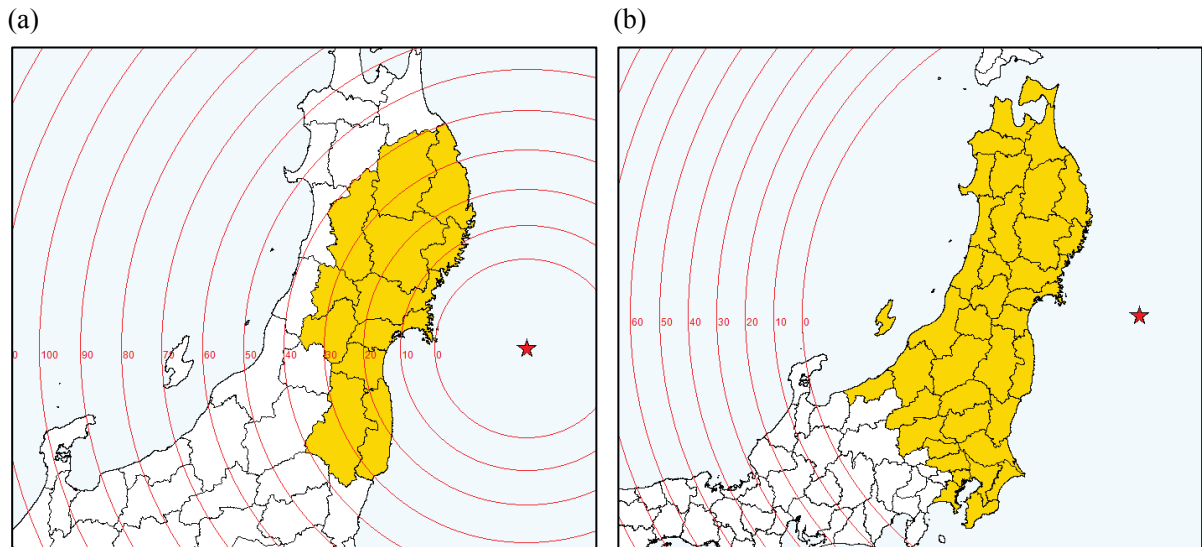


図 3-4: (a) 東北地方太平洋沖地震で警報発表対象となった地域. (b) 現在の警報更新定義では予報第 14 報で警報対象となる地域. 同心円は警報発表時における主要動到達までの猶予時間を示す.

3.2.2 震度推計に経験式を用いることによる精度の限界

緊急地震速報（予報）に含まれる予報資料に記載されるのは、破壊開始点の位置情報であり、断層面情報ではない。緊急地震速報を使って震度を推定する場合には、距離減衰式などの経験式を用いることが多い。ここで、多くの場合に使われている気象庁告示の方法^{9), 10)}について簡単に説明する。まず、緊急地震速報で発表される M から、距離減衰式で使用する M_w に宇津(1983)¹¹⁾を用いて変換する（式 3-1）。

$$M_w = M - 0.171 \quad \text{式 3-1}$$

緊急地震速報の震源情報には断層領域に関する情報が含まれていないため、断層最短距離は式 3-2 に示す M_w から推定される断層長 L (km)¹²⁾の半分を震源距離から引いた値とする。

$$\log L = 0.5M_w - 1.85 \quad \text{式 3-2}$$

地震の規模が大きくなると、断層面の形状や強震動生成域位置の影響などにより、この仮定から大きく外れてくることになる。次に、司・翠川(1999)¹³⁾の工学的基盤における最大速度の距離減衰式（式 3-3）から最大速度を求め、約 1 km メッシュに求められている表層地盤の増幅率を掛けて地表最大速度とする。

$$\log V = 0.58M_w + 0.0038D - 1.29 - \log(x + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002x \quad \text{式 3-3}$$

V : 工学的基盤（S 波速度 600 m/s 相当層）における最大速度(cm/s)

D : 震源の深さ (km)

x : 断層最短距離 (km)

最後に地表最大速度 PGV から震度 I への変換式（式 3-4）¹⁴⁾で予測震度を求める。

$$I = 2.68 + 1.72 \log PGV \quad \text{式 3-4}$$

図 3-5 に気象庁告示の方法で緊急地震速報（予報）最終報の震源パラメータを使った場合の予測震度分布、気象庁一元化処理震源リスト記載の震源パラメータを使った場合の予測震度分布、観測された震度分布を示す。 M が一番大きく推定された予報最終報による予測でも、東北地方の太平洋側と関東地方で過小評価となっている。一方で、気象庁一元化処理震源リストの震源パラメータに

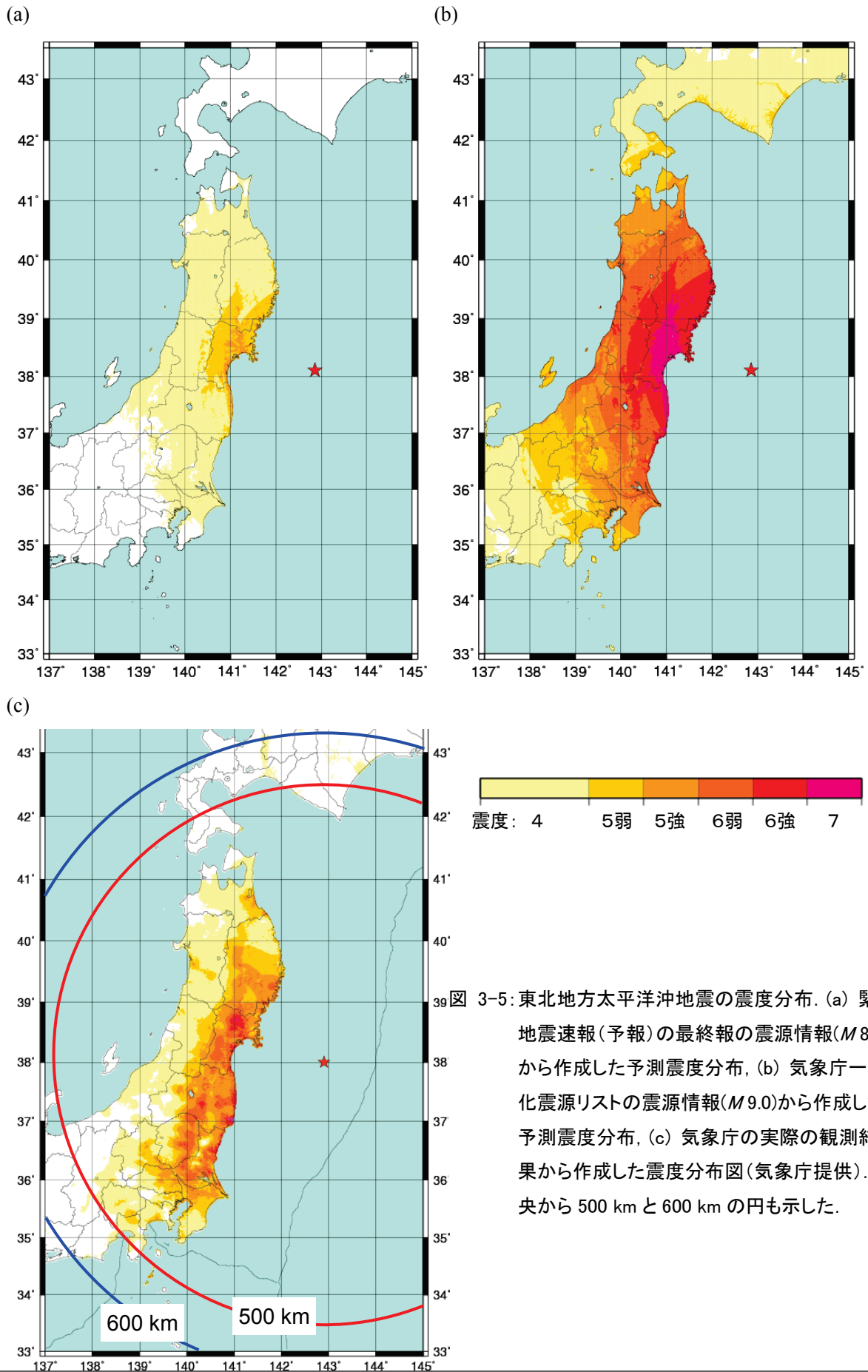


図 3-5: 東北地方太平洋沖地震の震度分布. (a) 緊急地震速報(予報)の最終報の震源情報(M8.1)から作成した予測震度分布, (b) 気象庁一元化震源リストの震源情報(M9.0)から作成した予測震度分布, (c) 気象庁の実際の観測結果から作成した震度分布図(気象庁提供). 震央から500 kmと600 kmの円も示した.

表 3-2: 東北地方太平洋沖地震後 2013 年 6 月末までに発表された緊急地震速報(警報)で、(a) 適切に発表されたもの、(b) 複数地震の分離の問題で適切に発表されなかったもの、(c) その他の理由で適切に発表されなかったものの数と割合。

| 期間 | (a)適切 | (b)不適切 (分離処理) | (c)不適切 (その他) | 警報発表数 合計 | (a)割合 | (b)割合 | (c)割合 |
|----------------|-------|------------------|-----------------|-------------|---------------------------------------|---------|---------|
| 11/03/11~03/15 | 9 | 12 | 6 | 27 | 33 % | 44 % | 22 % |
| 11/03/16~03/31 | 6 | 9 | 3 | 18 | 11/03/16 2 つの地震を区別する処理の設定値を見直す改善 | | |
| 11/04/01~04/30 | 11 | 12 | 3 | 26 | | | |
| 11/05/01~05/31 | | 4 | 1 | 5 | | | |
| 11/06/01~06/30 | | 3 | 2 | 5 | 37 % | 47 % | 17 % |
| 11/07/01~07/31 | 4 | | 1 | 5 | (22/60) | (28/60) | (10/60) |
| 11/08/01~08/10 | 1 | | | 1 | | | |
| 11/08/11~08/31 | 2 | | | 2 | 11/08/11 警報の発表対象としない小規模地震を計算対象から外す対応策 | | |
| 11/09/01~09/30 | 3 | | 1 | 4 | | | |
| 11/10/01~12/31 | 3 | 1 | 1 | 5 | | | |
| 12/01/01~03/31 | 7 | | 1 | 8 | | | |
| 12/04/01~06/30 | 4 | 2 | | 6 | 81 % | 10 % | 10 % |
| 12/07/01~09/30 | | | 1 | 1 | (25/31) | (3/31) | (3/31) |
| 12/10/01~12/31 | 1 | | | 1 | | | |
| 13/01/01~03/30 | 2 | | | 2 | | | |
| 13/04/01~06/30 | 3 | | | 3 | | | |

よる予測では、東北地方の日本海側などで過大評価となり、仮に正しく震源パラメータが求められたとしてもこの手法の震度推計では実際に観測されるものと大きく異なることが分かる。つまり、適切な震度推計ができないのは、(1)の理由だけでなく(2)の影響も大きい。従って、気象庁の発表する震源情報の精度が向上したとしても、それだけでは問題解決とならず、許可事業者が行う(2)の処理についても何らかの対策が必要となる。

3.2.3 複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合

東北地方太平洋沖地震後に発表された緊急地震速報では、余震活動などにより広範囲に数多くの地震が発生したため、複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合に別の地震と区別して処理できず、震源位置や規模が全く異なる情報が発表されることが多発した¹⁵⁾。そのため気象庁は 2011 年 3 月 16 日に 2 つの地震を区別する処理の設定値を見直す改善策を実施し、さらに同年 8 月 11 日に緊急地震速報(警報)の発表対象としていない小地震の地震を計算対象から外す対応策を実施し、誤った警報を発表する頻度を減らすための策を講じた¹⁶⁾。この対応策により約半数については改善されるものとしている。東北地方太平洋沖地震後、2013 年 6 月末までに発表された警報で、(a) 概ね適切に発表されたもの、(b) 複数の地震を分離して処理できず適切な発表ができなかったもの、(c) 停電や通信回線の途絶のため使用できる地震計の数が減少したことや震源の推定・震度の予想の誤差などにより適切に発表できなかったものの数・割合を表 3-2 に示す。2011 年 8 月の

改善策実施までは半数以上の警報が適切でなかったが、改善策実施後は約 80 %が適切に発表されるようになった。また、2011 年 5 月以降は発表される警報の回数そのものも減少している。

3.3 課題への対策

前節で述べた課題に対して、許可事業者が対応可能な策を検討し、実施した内容について紹介する。対象としたのは、関東地方にある危険物を取り扱う工場で、機器の自動制御と工場内の一斉放送を行っている利用者である。一斉放送と自動制御の 2 段階のしきい値を設定し、一斉放送のしきい値は自動制御より低めに設定している。自動制御については、誤情報で制御を実行するとその影響は設備全体に及ぶが、一斉放送については多少の誤報は許容でき、揺れに備えた行動に移すことができるメリットの方が大きいため、安全側の設定としている。

東北地方太平洋沖地震とそれ以降に発表された緊急地震速報について、利用者から解決を求められた課題は次の 2 点である。

- A) 東北地方太平洋沖地震発生時に、震度の予測が一斉放送を行うしきい値に達せず、一斉放送ができなかった。実際には震度 5 強程度の揺れであったので、放送できるようにならないか。
 - B) 東北地方太平洋沖地震後に発表された緊急地震速報では、過大評価になることが多く、自動制御をするには誤報のリスクが大きすぎる。当面は自動制御のモードは外し、運転員によるマニュアル制御で運用を行いたい。自動制御に戻すタイミングはどのように考えれば良いか。
- A)の問題については、3.2.1 と 3.2.2 で述べた限界から生じたものである。特に関東地方の利用者にとっては、最終報でも予測震度が小さく、報知などの出力を何も行えなかったケースが多かった。B)の問題については、3.2.3 で述べた限界が原因であり、主に表 3-2 の「(b) 複数の地震を分離して処理できず適切な発表ができなかったもの」への対策である。これらの課題に対して、それぞれ以下の 2 つの対策を取った。

3.3.1 大規模な地震の震度推計

3.2.1 と 3.2.2 で述べた限界から、大規模な地震の震度推計の精度は、現在の手法の延長では限界がある。M7 程度より小さい地震であれば、断層破壊にかかる時間は緊急地震速報発表中の早い段階で終了し、距離減衰式を使用する場合の断層最短距離についても大きな問題とはならない。しかし、M8 クラス以上の地震については、これらの限界により結果の信頼性は低下する。2007 年 10 月緊急地震速報が本運用開始となった以降に発生した M7.0 以上の地震（内陸または地震観測網に近い沿岸で発生したものに限る）について、緊急地震速報（予報）第 1 報発表から実際の $M-0.3$ または緊急地震速報（予報）で発表した M の最大値 -0.3 以上の M を発表するまでの時間を横軸 M としてプロットしたのが図 3-6 である。この時間はおよそマグニチュード成長にかかる時間と見なせる。同時に M ごとの断層長を式 3-1、式 3-2 で評価して、破壊伝播速度 2.8 km/s とした場合に断層長の半分の長さを破壊するにかかる時間（断層破壊時間）を破線で示した。データが M7 付近と M9.0 のみで M8 付近のデータがないが、緊急地震速報の M 成長にかかる時間をおおよそ説明している。大規模な地震の場合、特に初期段階では予測震度の過小評価をすることとなり、大きな揺れが起きても何も伝達できないことになるが、その対策としてしきい値を下げる対応では中小地震に

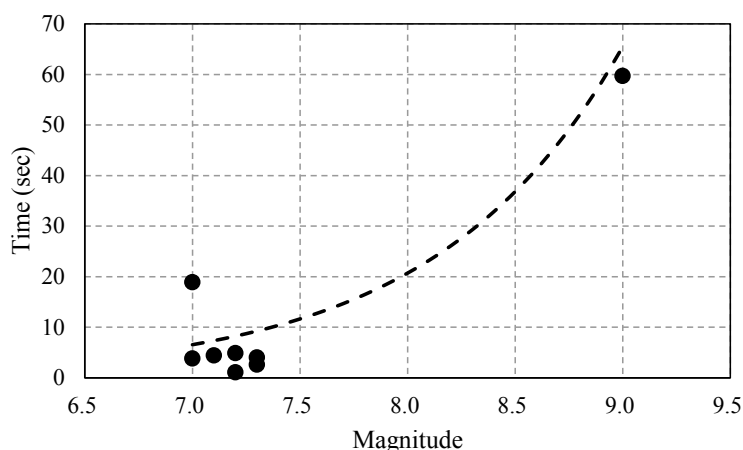


図 3-6: 地震の規模とマグニチュード成長にかかる時間の関係。点線は断層長から推定した断層破壊時間。

対しても同様にしきい値を下げることとなり、運用上問題を生じる。

そこで、大規模な地震については、緊急地震速報を震度予測するための情報としてよりも、「非常に大規模な地震が発生した」というトリガー情報として使用することを提案した。具体的には、利用者の端末から半径 600 km 以内のエリアで M 7.5 以上が推定される緊急地震速報（予報）を受信した場合には、予測震度に関わらず一斉放送を行うこととした。ここで、 M のしきい値については M 8 クラスより大きい地震が発生した時に確実に出されるであろう値で、0.5 の誤差を考慮して M 7.5 とした。半径については、東北地方太平洋沖地震における震度分布で震度 4 以上を観測したのが半径ほぼ 500 km 以内である（図 3-5(c)）ことから、同程度の規模が最大クラスだと考え、余裕を取って 600 km とした。ただし、自動制御については誤報のリスクを考慮してこのロジックでは動作させず、一斉放送の条件としてのみ組み込んだ。

南海トラフの巨大地震では、想定される震源域が東北地方太平洋沖地震と比べて陸地に近いことから、緊急地震速報の猶予時間も短くなることが想定される。なるべく早い段階で巨大な地震が発生したようだという情報だけでも伝達できれば、報知するしきい値に達していないので何も知らせることができなかったということを防ぐことができる。発生頻度の多い中小地震では、利用者の指定した位置のピンポイントの予報がサービスとなりうるが、その適用範囲から外れるものについては、別の報知出力のための判定ロジックを持っていてもよいと考える。

この問題の他の解決法として、現地に地震計を設置して緊急地震速報と OR 判定することも考えられる。現場では限られた費用の中で問題を解決する必要がある、様々なメニューが用意されていると利用者が費用と効果を比較検討できる。

3.3.2 複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合の適切でない情報への対応

地震の M が過大評価された情報によって、誤った自動制御をすることを避けるため、東北地方太平洋沖地震後は一時的に自動制御のモードを外し、制御判定を満たす緊急地震速報（業）受信時でも運転員によるマニュアル制御で運用することにした。この種の情報は、複数の小規模の地震を 1 つの大規模な地震と認識することから、全てのケースで M が過大評価される。この「誤報」の発生頻度が、東北地方太平洋沖地震発生以前のレベルまで戻れば自動制御のモードに戻りたいが、どのタイミングで自動制御のモードに戻すべきか判断基準が必要となるため、以下のような検討を行

った。

まず、東北地方太平洋沖地震発生前の「複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合の適切でない情報」事象の発生確率を P_0 、東北地方太平洋沖地震発生からの経過週数を t 、2011年8月11日の改善策実施後の発生確率を $P(t)$ とすると、

$$P(t) = P_0 \times \frac{1}{2} \times \left(\frac{N(t)}{N_0} \right)^2 \quad \text{式 3-5}$$

と表される。ここで、 N_0 は東北地方太平洋沖地震発生前の週あたりの緊急地震速報（予報）発表回数（ここでは2008年1月から2011年2月までの発表回数の平均10.4回/週を使用した）、 $N(t)$ は t 週目の週あたりの予報発表回数である。右辺第2項は、8月11日の改善策によりほぼ半数の事例について改善された効果を示す。右辺第3項は、事象の発生確率が単純には地震発生頻度の2乗に比例することを示す。

次に、 t 週目の予報発表回数を、

$$N(t) = N_0 + \frac{K}{(t+C)^p} \quad \text{式 3-6}$$

でフィッティングする。右辺第2項は、東北地方太平洋沖地震の余震発生頻度が改良大森公式^{17),18)}に従い減少することを示している。ただし、ここでは $C=0$ とする。このモデルは非常に単純化したものであり、震源域以外の地震活動の活発化の影響は全く考慮していない。式3-5において、この事象の発生確率が東北地方太平洋沖地震前のレベルに戻るには、

$$N(t) = \sqrt{2}N_0 \quad \text{式 3-7}$$

まで減少する必要がある。

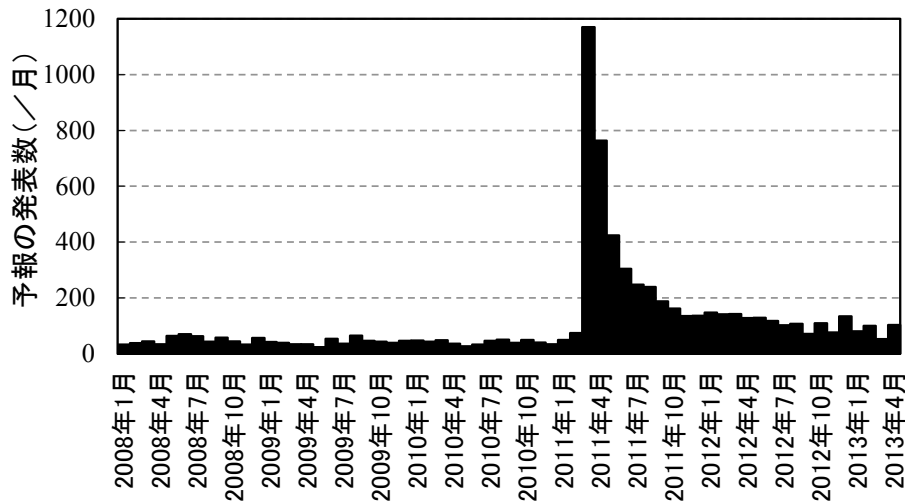
図3-7にこれらの内容を図示した。図3-7(a)は、月あたりの緊急地震速報（予報）発表回数の推移を示している。2008年1月から2011年3月の東北地方太平洋沖地震発生前までは、1ヶ月あたり約45回であり、ほぼ一定でバラツキも小さかったが、東北地方太平洋沖地震が発生した2011年3月には1,170回を数えた。その後減少傾向にあり、2013年4月は地震前の約2倍の発表回数があるが、地震前と同程度の発表回数の月も現れ始めている。

図3-7(b)は、東北地方太平洋沖地震発生後の週あたりの緊急地震速報（予報）発表数の式3-6によるフィッティングを示す。簡単なモデルであるが、現実の発表回数を良く示している。2011年8月と2012年6月に、利用者に対してそれまでの緊急地震速報（予報）発表回数を式3-6でフィッティングし、発表回数が式3-7まで減少する時期の見通しを説明した。2011年8月末では453週（約8.7年）、2012年6月末では340週（約6.5年）となっており、どちらの時点の予想でも2011年8月の改善策と緊急地震速報（予報）発表数の自然な収束では5年以上かかるという結果となった。2011年8月末における事象発生確率は地震前の約7.8倍であり、2012年6月末には約3.4倍と半分以下に減少している。2012年6月以降は緊急地震速報発表回数のバラツキが大きくなっており、2013年4月末までのデータでフィッティングすると222週（約4.3年）となった。週によっては式3-7のレベルより少ないこともある。

平均値としてのフィッティングでは、事象発生確率が地震前の水準に戻るまでに5年程度かかることが予想される。2012年6月以降発表回数のバラツキが大きくなってきたため、今後減少傾向

がどのようになるか見通すことは難しいが、2013年4月時点での事象発生確率は地震前の約2倍まで下がっている。今後、緊急地震速報発表側のシステム改善により、式3-5の第2項が小さくなれば、改めて事象発生確率を推定し、自動制御に戻す意思決定のための助けとなることができると考えている。

(a)



(b)

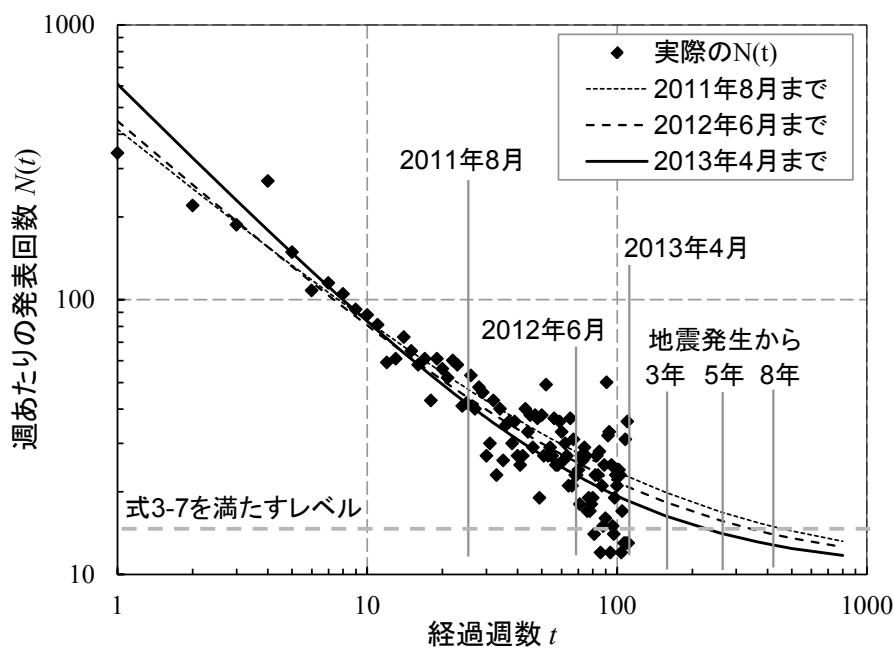


図 3-7:(a) 2008年1月から2013年4月までに発表された緊急地震速報(予報)の数。(b) 東北地方太平洋沖地震後の週あたりの予報発表回数と、2011年8月まで、2012年6月まで、2013年4月までのデータで式3-6をフィッティングした曲線。

3.4 アプリケーション事例:緊急地震速報を用いた道路安全即時評価システム

3.4.1 システムの目的

大規模地震の発生時において、ライフライン機能の中でも特に高速道路網は、物資の輸送・けが人の搬送などの点から重要な役割を担っている。地震発生後即座に安全性を判断することは、道路管理者として重大な責務である。これまでに多くの地震で大規模な路肩崩壊などによる被害が起きており、2009年の駿河湾を震源とする $M6.5$ の地震では、静岡県牧之原市において震度6弱を観測し、東名高速道路吉田―相良牧ノ原間で路肩崩壊が生じた。法面の崩壊規模は長さ40m、高さ10mに達したが、交通規制を実施するまでに時間を要した¹⁹⁾。高規格道路の保全にとって法面崩壊等の被害を迅速に把握することは、二次被害の発生を防止することにつながる。この他にも、地震における盛土の大規模な被害は、1993年釧路沖地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2011年東北地方太平洋沖地震等、数多く発生している。高速道路の土工部の総延長において、被害箇所の特定には時間がかかる。また、道路土工部のような線上構造物は、橋梁のような構造物とは異なり、コスト面等で耐震化が困難な場合が多い。そのため被災状況を適切に把握し、供用可否等の判断を迅速に行うことが二次被害の危険性を減らす上で必要とされる。

緊急地震速報は一般には「大きな揺れが来る前に知らせる情報」として活用されているが、一方で地震発生後最も早い「震源情報」という側面も持っている。気象庁から発表される従来の地震情報で最も早いのは、地震発生約2～3分後に発表される「震度速報」であり、震源や規模の情報を含む「震源に関する情報」や「震源・震度に関する情報」が発表されるのは、地震発生約5分後である²⁰⁾。緊急地震速報(予報)の第1報は地震発生数秒～十数秒程度で発表され、最終報が発表されるのはそれから1～2分後である。従って、緊急地震速報の震源情報を用いれば、従来の地震情報を使うより数分早く情報を得ることができる。

揺れが来る前、または揺れている最中に情報を受信することで、揺れがおさまった直後に対応すべき事項・優先順位の意思決定のための補助情報として活用することが考えられる。そこで、高速道路の道路土工部における被災状況を即時に推定し、直後対応を支援するためのシステムとして、緊急地震速報の震源情報を利用した意思決定補助システムを構築し、被災時の供用可否判断の迅速化を目指すこととした。

3.4.2 システム概要

安全即時評価のためのプロトタイプシステムとして、緊急地震速報(予報)から震源情報を取得し、路線周辺の震度分布・最大加速度分布を即時に表示するシステムを製作した。対象は、徳島県東部に位置する徳島自動車道 脇町―徳島区間(延長41.1km)および高松自動車道 板野―鳴門区間(延長10.5km)とした。システム構成図を図3-8に示す。本システムは、(a)解析サーバと(b)情報公開サーバから構成される。前者は、配信事業者から緊急地震速報(予報)を受信し、最終報の震源情報から距離減衰式を用いて路線周辺の揺れの予測演算を行う。予測結果のうち代表的な指標(各区間における最大予測震度など)は、PC・携帯電話へのメール送信を通じて担当者に通知する。情報公開サーバはWebサーバになっており、道路管理者はブラウザを使って詳細情報を取得できる。

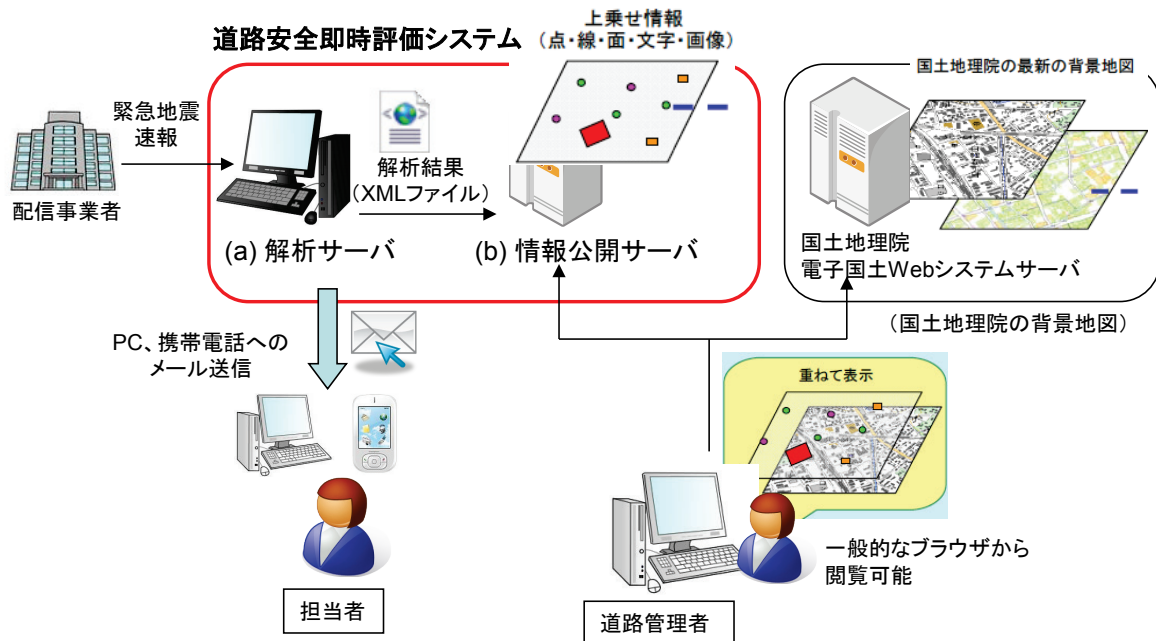


図 3-8: 道路安全即時評価システム プロトタイプシステム構成図.

(1) 予測演算

本システムでは、距離減衰式を使って路線周辺の震度と最大加速度を求める。評価値点は、西日本高速道路株式会社四国支社の高速道路建設時のボーリングデータのある地点と四国地盤情報活用協議会がまとめた四国地盤情報データベース²¹⁾のボーリング地点に加え、揺れの分布の全体像をつかむ目的で路線とその周辺 1 km 程度のエリアを含む 1 辺の長さが約 250 m の 4 分の 1 地域メッシュとした。

表層地盤特性の評価には、表層 30 m の平均 S 波速度 (AVS30) を用いた。ボーリングデータについては、道路橋示方書のせん断弾性波速度 V_s と N 値の関係式²²⁾を用い、AVS30 を求めた。4 分の 1 地域メッシュの表層地盤特性については、独立行政法人防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS²³⁾で公開されている表層地盤データの「表層 30 m の平均 S 波速度」²⁴⁾を用いた。AVS30 からは藤本・翠川(2006)²⁵⁾を用いて速度増幅率・加速度増幅率を求めた。

断層最短距離の考え方は、3.2.2 と同様に M から推定される断層長の半分を震源距離から引いたものとした。震度予測には司・翠川(1994)の最大速度の断層最短距離減衰式¹³⁾を用い、地表最大速度から震度への変換には、藤本・翠川(2005)²⁶⁾を用いた。最大加速度予測には Kanno *et al.* (2006)²⁷⁾を用いた。

(2) 情報の表示

求められた予測結果を地図上に表示するために、国土地理院が無償サービスしている「電子国土 Web システム」²⁸⁾を利用した。情報公開サーバにテキスト (XML) 形式の書式情報「電子国土プロファイル」²⁹⁾で定められた形式で作成したデータファイル (上乗せ情報) と、Web ページを記述する HTML ファイルをアップロードする。XML 形式のデータはファイルサイズが大きいと表示時間がかかるため、表示時間短縮のために最適化したネイティブフォーマットに変換しておく。HTML ファイルは、JavaScript を用いて電子国土 Web システム API 関数²⁹⁾を呼び出すよう記述してあり、

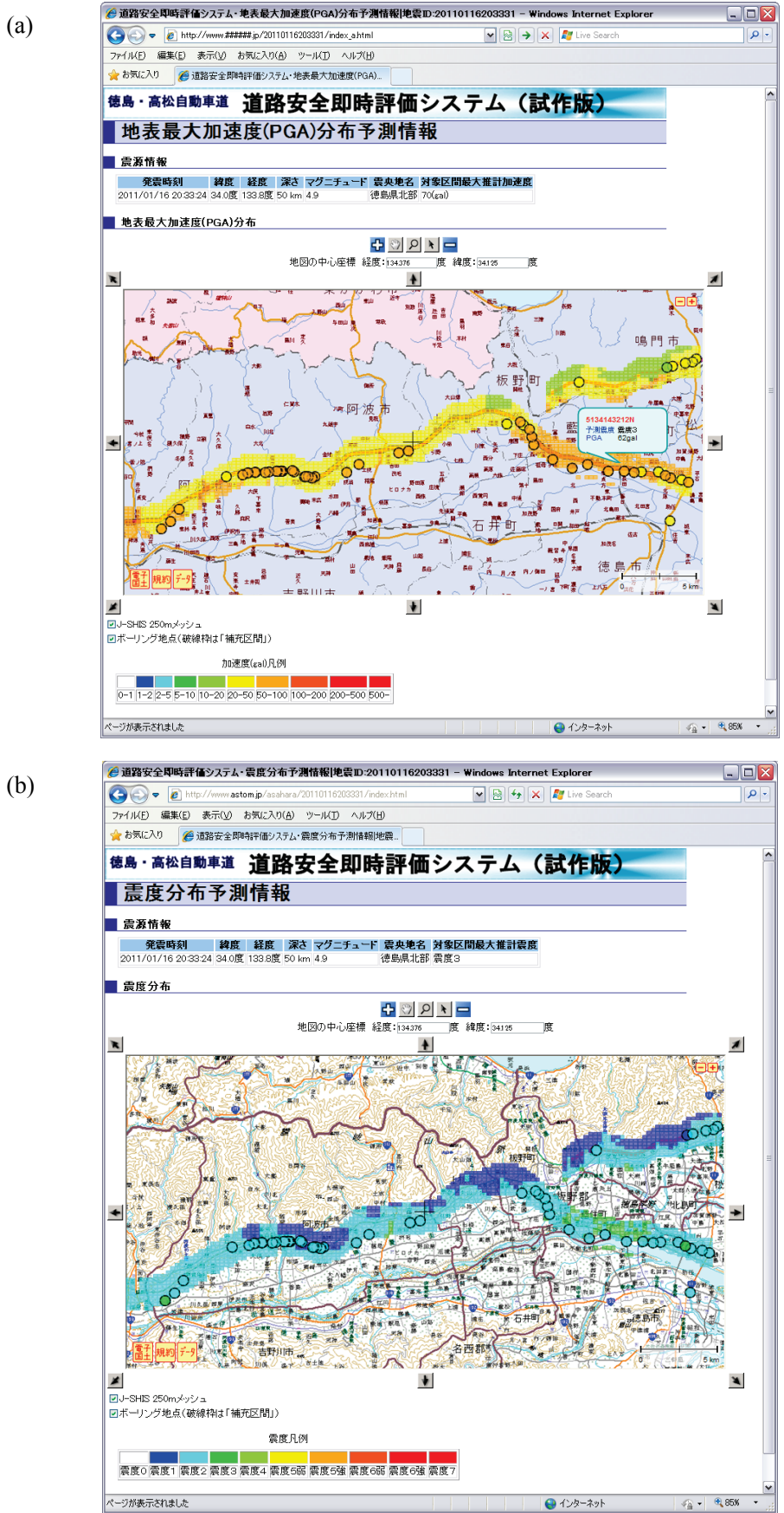


図 3-9:(a) 地表最大加速度予測情報, (b) 震度予測情報の表示例.

利用者がWebブラウザを使って情報公開サーバのHTMLファイルにアクセスすると、国土地理院の背景地図と重なった状態で情報を閲覧することができる。電子国土Webシステムの機能を使うと、自由に表示範囲の拡大・縮小や表示する地域の選択が可能であり、さらに地図に重ね合わせる情報を選択することもできる。電子国土Webシステムは、広く公開されるWebページのほかにイントラネット上でも利用できるため、本システムのようにWebページの閲覧を許可する対象が社内の管理者に限定し、情報公開サーバがイントラネット上にあるような場合でも利用可能である*。

図 3-9 に地表最大加速度予測情報・震度予測情報の表示例を示す。ここでは、予想される最大加速度・震度の大きさに応じて色が塗り分けられている。対象区間に沿って矩形メッシュで表示されているのは沿線の4分の1地域メッシュについて計算した結果であり、円で示されているのはボーリング地点についての計算結果である。計算結果のある場所にマウス位置を合わせると、ポップアップでそのメッシュに関する情報が表示されるようにしている。

3.4.3 適用範囲

3.2.1 と 3.2.2 で議論した通り、 $M 8$ クラス以上の大地震については緊急地震速報の震源情報と距離減衰式による予測結果の信頼性は高くない。予報最終報を使うため、 M の成長に多少時間がかかってもよいが、3.2.1 で述べたように M が飽和することを考慮すると、 $M 8$ を超える大地震への適用は適切ではない。一方で $M 7$ 程度以下の地震の場合は、これまでも比較的適切に規模推定が行われている実績があり^{2),30)}、断層長の影響も大きくない³¹⁾。そこで、本システムでは予報最終報において $M 7.5$ 以上の場合は揺れの予測を行わず震源情報を伝えるのみとし、 $M 7.5$ 未満の場合のみ地震動予測分布図を出力することとした。

3.4.4 実用化システム

上記プロトタイプシステムでは、地震動の大きさの情報のみの出力であり、被害予測までは対応できていない。また、 $M 8$ クラス以上の地震に対して地震動の情報を出力できない。実運用システムには、地震動の大きさから被害程度を予測し、点検箇所 の優先順位 の意思決定を補助するための情報を出力する必要があることと、南海トラフ巨大地震など $M 8$ クラス以上の地震への対応が必要である。そのためには今後以下の作業が必要である。

まず、対象区間のうち高盛土・谷埋め盛土・液状化の可能性のある地点を抽出し、南海トラフの地震や近傍の活断層による地震動波形を策定する。また、液状化解析（有効応力解析）を実施し、安定性と路面位置での沈下量を算定する。外力（地震動強さ）を変化させて計算を行い、地震動の大きさと沈下量等の被害の大きさを比較できる表（地震動被害比較表と呼ぶ）を作成する。

次に、路線上に設置した地震計記録をシステムに取り込むことで、緊急地震速報の震源情報を元に計算した地震動の大きさを実際の観測値で補正し、外力情報を作成する機能を作成する。地震動分布の予測は、緊急地震速報受信時と地震計観測記録が得られた時の2段階で行い、前者の結果は速報として用いる。その後、路線に設置した地震計から観測記録が得られた場合、観測された地震動と緊急地震速報の震源情報を使い、より高精度な地震動分布を求める。この時、 M がそれほど大きくなく、震源が路線エリア外にある場合は、経験式で求めた地震動分布を観測記録で補正するこ

*本開発は2010年から2011年頃に電子国土Webシステム Ver. 2 を使って実施したが、電子国土Webシステム Ver. 1 から Ver. 3 は2013年秋頃終了し、Ver. 4 へ移行される。Ver. 4 では上記システムの利用方法や適用可能な環境についても変更となる可能性がある。

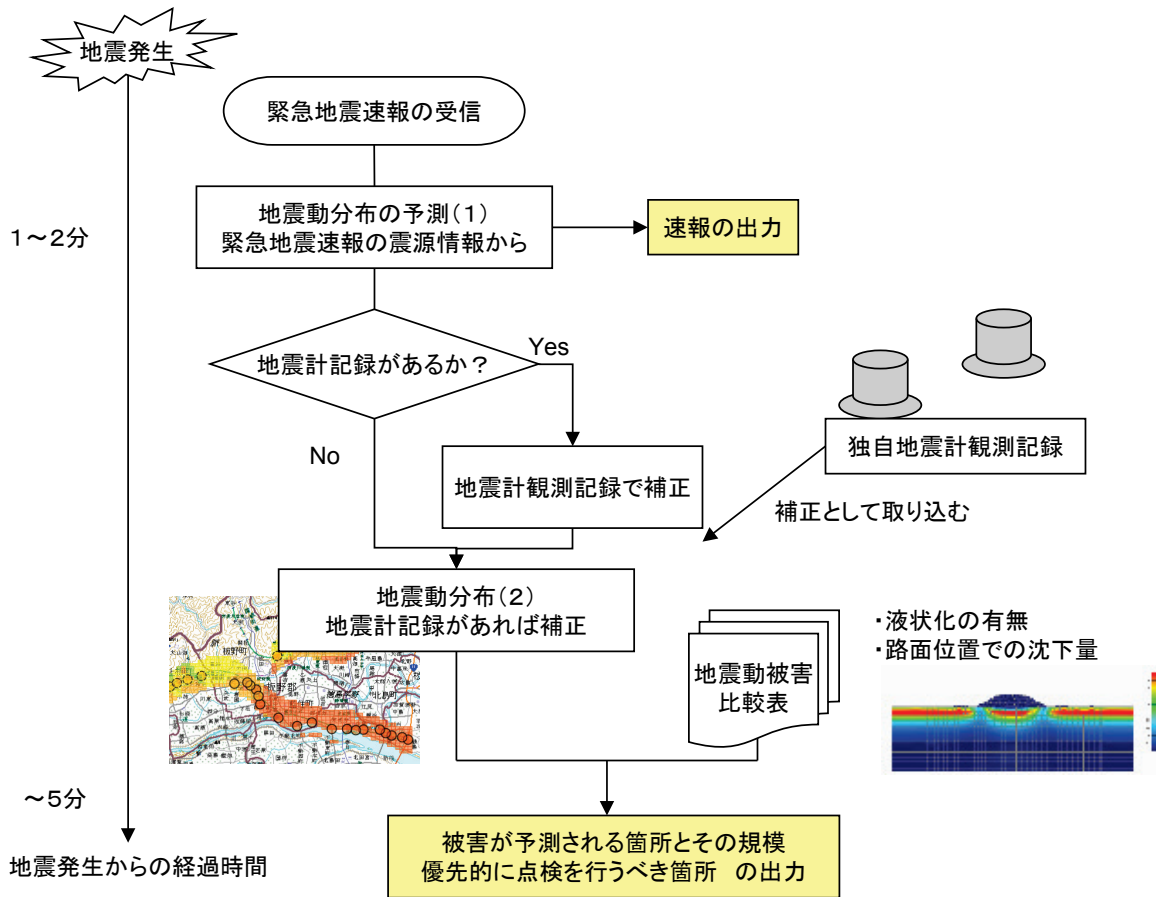


図 3-10: 道路安全即時評価実用化システムのフロー。

とになる。海溝型地震など、緊急地震速報の点情報のみからでも断層の向きが事前情報によりおおよそ推定できるような場合は、観測情報から補間して分布図を作成する際の拘束条件として緊急地震速報の震源情報を使用することが考えられる。南海トラフで発生する $M8$ を超える地震については、想定されるいくつかのパターンで揺れの分布をあらかじめ計算しておき、実際に観測された地震動に近い計算結果と震源情報から地震動分布の推定を行う。

最後に、外力と地震動被害比較表を用いて設計余裕度判定を行い、結果を出力する仕組みとして統合する。これらを反映させた実用化システムのフローを図 3-10 に示す。路線に設置した地震計のデータを取り込むことにより被害程度を予測し、優先的に点検を行うべき箇所の情報を出力する。

3.5 まとめ

本章では、特に大規模な地震とその後における緊急地震速報の課題について、許可事業者が実際に利用者に提供した対応策を2例示した。大規模な地震における推定震度については、地震の規模決定の問題と経験式を用いることによる精度の限界から信頼性の高い結果が得られないため、震度推計結果を使うのではなく、「非常に大規模な地震が起きた」というトリガー情報として活用する提案を行い、システムに実装した。複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した場合の適切で

ない情報については、緊急地震速報（業）を使った自動制御に戻す時期を検討するにあたり、誤報の発生確率を定量化することにより運用形態の変更の意思決定を補助する情報を利用者に提供した。

これらの試みは、緊急地震速報をより有効に利活用するために、許可事業者が予報業務の許可内容について変更することなく、既に許可を受けている範囲で利用者に提案できるものである。適切でない情報が一部含まれるという理由で緊急地震速報の利用を全て取りやめてしまうことはもったいなく、工夫をすることで情報を活かすことができることを利用者に提案することが許可事業者には求められる。緊急地震速報の限界については以前から指摘されていたことではあるが、「震源に近い場所では間に合わない」や「1観測点の処理ではノイズによる誤報の可能性がある」など普段から経験している限界については利用者にも説明がなされ、許可事業者から1観測点処理による情報は自動制御には使わないなどの適切な助言・対応がなされているようである。しかし今回議論対象とした課題については、発生頻度が低いためこれまで対応策がほとんど検討されていなかった。南海トラフ巨大地震など今後の巨大地震に対しては、東北地方太平洋沖地震で得た教訓を活かしていかねばならない。緊急地震速報の将来の抜本的な改善のために、震源域の広がりを即時に推定する研究^{32), 33)}や震度推定を直接行うためのパラメータの研究³⁴⁾、複数地震の分離に関する研究³⁵⁾などが数多く行われている。また、強震モニタ³⁶⁾のようリアルタイムの観測値を取り込むことも考えられる。2013年3月からは長周期地震動の観測情報の即時公開も試行されている³⁷⁾。気象庁から発表される震源パラメータが変更・追加されたり、新しい情報を取り込むとなると、実用までに数年単位の時間が必要となることが考えられる。本章での提案は抜本的な改善が実現するまでの過渡的なものであるが、次の巨大地震の発生が切迫しているとされる現状において、現在入手できる情報を最大限に活用するための工夫も必要である。

高速道路の土工部における地震時の被災状況を即時に推定し、直後対応の意思決定を支援するシステムのプロトタイプとして、緊急地震速報（予報）の震源情報を用いて対象路線の最大加速度と震度の分布を予測するシステムを製作した。結果の表示には国土地理院の電子国土 Web システムを利用し、容易に地図と重ねて表示できるようにした。南海トラフ巨大地震などへの対応として、緊急地震速報（予報）で $M7.5$ 以上となる場合は、あらかじめ想定されるいくつかのパターンで計算しておいた揺れの分布と実際に地震計で観測された地震動の大きさから地震動分布の推定を行うこととした。その上で、高盛土・谷埋め盛土・液状化の可能性のある地点について、地震動の大きさと被害の大きさを比較できる表を作成し、被害が予測される箇所とその規模・優先的に点検を行うべき箇所の情報を出力するという実用化システムのフローを作成した。

参考文献

- 1) 気象庁：緊急地震速報について、<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/portal/index.html>, 2013年5月31日閲覧。
- 2) 気象庁：緊急地震速報の本運用開始に係る検討会（第1回）の概要について、<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kentokai1/index.html>, 2005年11月18日。
- 3) 気象庁：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について（第28報）、<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/25b/201103251730.html>, 2011年3月25日。
- 4) 気象庁：平成23年3月11日14時46分頃の三陸沖の地震について、

- <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11b/201103111600.html>, 2011年3月11日.
- 5) 気象庁：「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の規模について(第3報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11d/201103111730.html>, 2011年3月11日.
 - 6) 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>, 2011年3月13日.
 - 7) 干場充之, 尾崎友亮: 2011年東北地方太平洋沖地震での緊急地震速報と津波警報, *地震2*, **64** (3), 155 – 168, 2012.
 - 8) Hoshiya, M., Iwakiri, K., Hayashimoto, N., Shimoyama, T., Hirano, K., Yamada, Y., Ishigaki, Y. and Kikuta, H.: Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0) – Earthquake Early Warning and observed seismic intensity–, *Earth Planets Space*, **63** (7), 547 – 551, 2011.
 - 9) 気象業務法施行規則第十条の二第一号口の計算方法を定める件(平成十九年十一月二十六日気象庁告示第十一号), 2007.
 - 10) Iwakiri, K., Hoshiya, M., Nakamura, K. and Morikawa, N.: Improvement in the accuracy of expected seismic intensities for earthquake early warning in Japan using empirically estimated site amplification factors, *Earth Planets Space*, **63** (2), 57 – 69, 2011.
 - 11) 宇津徳治: 各種マグニチュード間の関係, *東京大学地震研究所彙報*, **57**, 465 – 497, 1982.
 - 12) 宇津徳治: 地震学第3版, 共立出版, 376 pp., 2001.
 - 13) 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・速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文報告集*, **523**, 63 – 70, 1999.
 - 14) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, *地域安全学会論文集*, **1**, 51 – 56, 1999.
 - 15) 気象庁: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震以降の緊急地震速報(警報)の発表状況について, http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/29a/eew_hyouka.html, 2011年3月29日.
 - 16) 気象庁: 緊急地震速報の改善について, http://www.jma.go.jp/jma/press/1108/10a/eew_kaizen.html, 2011年8月10日.
 - 17) 宇津徳治: 地震のマグニチュードと余震の起こり方, *地震2*, **10** (1), 35 – 45, 1957.
 - 18) Utsu, T.: A statistical study on the occurrence of aftershocks, *The Geophysical Magazine*, **30**, 521 – 605, 1961.
 - 19) 大角恒雄: 四国地盤図を用いた高速道路における緊急地震速報即時評価システムの構築, *四国地盤情報活用協議会平成22年度研究発表会*, 2010.
 - 20) 気象庁: 地震と津波～防災のために～, 2009.
 - 21) 四国地盤情報活用協議会: 四国地盤情報データベース(CD-ROM), 2010.
 - 22) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V. 耐震設計編), 318 pp., 2012.
 - 23) 独立行政法人防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>, 2013年5月31日閲覧.
 - 24) 松岡昌志, 若松加寿江: 地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ, 産業技術総合研究所 知的財産管理番号 H20PRO-936, 2008.
 - 25) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, *日本地震工学会論文集*, **6** (1), 11 – 22, 2006.

-
- 26) 藤本一雄, 翠川三郎: 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, *地域安全学会論文集*, **7**, 241 – 246, 2005.
 - 27) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H. and Fukushima, Y.: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96** (3), 879 – 897, 2006.
 - 28) 国土地理院: 電子国土ポータルサイト, <http://portal.cyberjapan.jp/>, 2013年5月31日閲覧.
 - 29) 国土地理院: 電子国土 Web システム技術情報, <http://portal.cyberjapan.jp/portalsite/docs/index.html>, 2013年5月31日閲覧.
 - 30) 気象庁: 緊急地震速報評価・改善検討会 技術部会 (第2回), http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/Meeting_HYOUKA/t02/index.html, 2010年2月26日.
 - 31) 浅原裕, 大角恒雄, 藤縄幸雄: 防災情報として活用するための緊急地震速報の精度評価, *リアルタイム災害情報検知とその利用に関するシンポジウム論文集*, 19 – 24, 2004.
 - 32) 堀内茂木: 巨大地震対応緊急地震速報システムの開発, 2011年地震研究所研究集会「地震動の瞬時解析と直前予測」, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/yure2011/11_horiuchi.pdf, 2013年5月31日閲覧.
 - 33) 倉橋奨, 入倉孝次郎: 断層破壊域の広がりを考慮した緊急地震速報の高度化, *日本地球惑星科学連合2012年度連合大会*, SSS40-P01, 2012.
 - 34) 山本俊六, 堀内茂木, 中村洋光, 呉長江: 緊急地震速報における震度マグニチュードの有効性, *物理探査*, **60** (5), 407 – 417, 2007.
 - 35) 山田真澄, Liu, A., and Mori, J.: 同時多発地震に対する緊急地震速報, *日本地球惑星科学連合2012年度連合大会*, SSS40-04, 2012.
 - 36) 青井真, 中村洋光, 功刀卓, 鈴木亘: 東北地方太平洋沖地震の揺れの成長と強震モニタ, *科学*, **81** (10), 1065 – 1067, 2011.
 - 37) 気象庁: 長周期地震動に関する観測情報 (試行) の気象庁 HP への掲載について, http://www.jma.go.jp/jma/press/1303/28a/tyoshuki_joho_hp.html, 2013年3月28日.
 - 38) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Transactions American Geophysical Union*, **79**, 579, 1998.

第4章 南海トラフ巨大地震の地震動推定と情報の活用方法

Chapter 4: Estimation of Seismic Waveforms of the Scenario Great Earthquake at Nankai Trough and Utilization of the Disaster Information

Abstract

南海トラフで発生する巨大地震について、2003年中央防災会議の断層モデルと2012年の南海トラフの巨大地震強震断層モデルを対象として、統計的グリーン関数法を使って徳島県内3地点（鳴門・阿南・牟岐）で加速度波形を合成した。また、2012年のモデルで緊急地震速報の発表シミュレーションを行った。これらの結果と津波想定を同じ時間軸上で重ねると、対象地点では緊急地震速報（予報）のしきい値は震度4以下に設定すべきであることや、地震動が終息して津波の影響が出始めるまでの時間が少ない場所では10分未満であることなど、地震発生時に緊急地震速報等の防災情報を活用するための課題をいくつか見いだすことができた。断層モデルから情報の発表をシミュレーションすることで、地震発生時の状況を具体的に想像することが可能となり、直後対応システムの信頼性向上につなげることができる。

Seismic waveforms of the scenario great earthquake at Nankai Trough with 3 sites (Naruto, Anan and Mugi) in Tokushima were synthesized on the statistical Green's function method using the fault models issued by the government in 2003 and 2012. Also, an announcement of the Earthquake Early Warning (EEW) by the 2012 model was simulated. When these results were overlaid on the same time axis, some issues became evident for utilizing the disaster prevention information efficiently. For example, the threshold intensity of EEW should be set lower than intensity 4 in JMA scale in these target sites, and it takes less than 10 minutes from the convergence of the seismic motion to the arrival of tsunami at southern Tokushima prefecture. The EEW simulation from the fault model enables the situation when the earthquake occurred imaginable, and leads to the reliability improvement of the earthquake response systems.

4.1 はじめに

東海・東南海・南海地震の震源域全てが一度に破壊する断層モデルは、2003年中央防災会議の「東南海、南海地震に関する報告」¹⁾内の「東海地震、東南海地震、南海地震の震源域が同時に破壊するケース」として検討されていた(以後、「中央防災会議モデル(2003)」と呼ぶ)。その後の2009年にとりまとめられた全国地震動予測地図²⁾の方式も踏まえたうえで、2012年に南海トラフの巨大地震強震断層モデルの断層パラメータが設定された^{3),4)}(以後、「巨大地震検討会モデル(2012)」と呼ぶ)。中央防災会議モデル(2003)では、1707年宝永地震以降の5地震(1707年宝永地震、1854年安政東海地震、1854年安政南海地震、1944年昭和東南海地震、1946年昭和南海地震)の推定震度の資料を重ね合わせ、それぞれの場所における最大の震度を再現できるように強震動生成域の強さ等を設定しており、全体として M_w 8.7である。一方、巨大地震検討会モデル(2012)では、深さ方向には想定震源域を深部低周波地震が発生している深さまで、水平方向には西に日向灘まで広げている。この領域を東から駿河湾域・東海域・南海域・日向灘域の4つのセグメントに分けて、それぞれのセグメントで地震の規模に関する相似則(スケーリング則)を適用して断層モデルが設定され、全体として M_w 9.0となった。設定する強震動生成域の場所については、過去の地震時の強震動生成域とおおむね同じ場所に位置する可能性が高いが必ずしもそうとは断定できないため、基本ケース・東側ケース・西側ケース・陸側ケースの4ケースが作成された。なお、巨大地震検討会モデル(2012)は「あらゆる可能性を考慮した最大クラスの巨大な地震・津波」を検討したものであり、次に発生する地震のモデルを予測したものではないことに注意する必要がある。

本章では、まず中央防災会議モデル(2003)の東南海+南海地震ケースと巨大地震検討会モデル(2012)の4ケース(基本ケース・東側ケース・西側ケース・陸側ケース)に対して、統計的グリーン関数法を用いて徳島県内3地点の地震動を作成した。次に巨大地震検討会モデル(2012)の基本ケースにおける緊急地震速報(予報・警報)の発表シミュレーションを行い、合成した地震動と同じ時間軸上に重ね、緊急地震速報のしきい値について検討を行った。また、地震動の後の津波についても、地震動の継続時間や津波警報発表のタイミングを考慮して、地震発生時の状況を具体的に想像できるようにした。

4.2 地震動の推定

4.2.1 断層モデル

中央防災会議モデル(2003)(東南海+南海地震)と巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース・東側ケース・西側ケース・陸側ケース)に対して、統計的グリーン関数法を用いて次項に示す徳島県内の3地点の工学的基盤における地震動を作成する。中央防災会議モデル(2003)のアスペリティと背景領域の領域を図4-1に、各セグメントの断層パラメータを表4-1に示す。また、巨大地震検討会モデル(2012)のSMGAと背景領域の領域を図4-2に、各セグメントの断層パラメータを表4-2に示す。巨大地震検討会モデル(2012)は基本ケースのほかに東側ケース・西側ケース・陸側ケースがあり、SMGAの位置を基本ケースに対してそれぞれ東側・西側・陸側に数10km程度ずらしたモデルを作成している(位置はそれぞれ図4-3, 図4-4, 図4-5に示す)が、これらの断層パラメー

タについては基本ケースとほぼ同じため省略する。ここで短周期地震動を周辺と比べて多く発生させる領域を示す用語として中央防災会議モデル(2003)では「アスペリティ」を、巨大地震検討会モデル(2012)では「SMGA」(強震動生成域)を用いている。元々アスペリティは平常時固着しているが地震時に大きくすべって強い地震波を出す領域を示す用語であるが、最近の研究で地震時に大きくすべる領域と強震動を生成する領域が必ずしも一致しないことが分かっている(例えば⁵⁾)ことから、最近では強震動を生成する領域については SMGA と呼ぶことが多くなっている。統計的グリーン関数法で計算に使用する場合にはどちらも強震動を生成する領域という同じ意味で使用する。

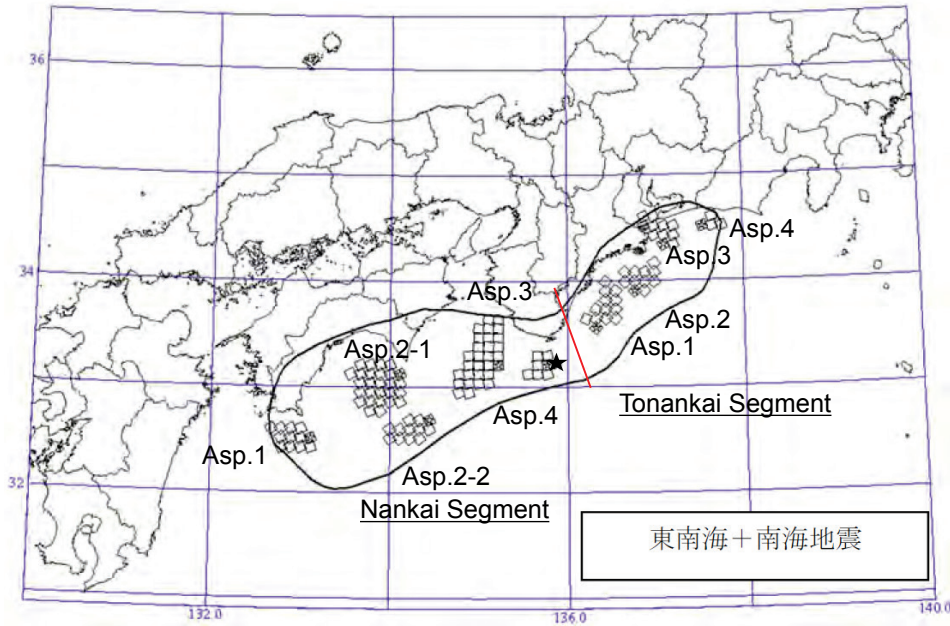


図 4-1: 中央防災会議モデル(2003)(東南海+南海地震)のアスペリティ・背景領域位置¹⁾。

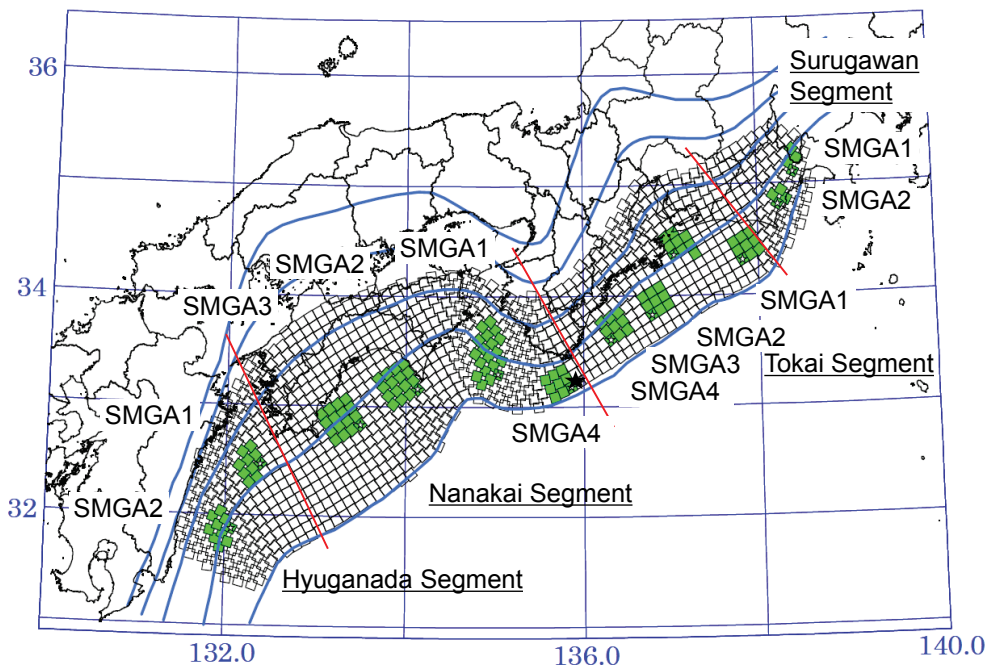


図 4-2: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)の SMGA・背景領域位置⁴⁾。

表 4-1: 中央防災会議モデル(2003)(東南海+南海地震)の断層パラメータ¹⁾.

| Whole | | | | |
|--------------|-------------------------|---------|---------|----------|
| | Area (km ²) | | | 52,565 |
| | Moment (Nm) | | | 1.12E+22 |
| | M_W | | | 8.6 |
| Segment Name | | Nankai | | Tonankai |
| Asperity-1 | Area (km ²) | 1,222 | | 1,308 |
| | Stress Drop (MPa) | 24.6 | | 21.9 |
| | Moment (Nm) | 4.3E+20 | | 4.3E+20 |
| | M_W | 7.7 | | 7.7 |
| Asperity-2 | Area (km ²) | 2,758 | 1,226 | 1,107 |
| | Stress Drop (MPa) | 24.6 | 24.6 | 21.9 |
| | Moment (Nm) | 1.5E+21 | 3.6E+19 | 3.3E+20 |
| | M_W | 8.0 | 7.0 | 7.6 |
| Asperity-3 | Area (km ²) | 2,963 | | 1,107 |
| | Stress Drop (MPa) | 24.6 | | 21.9 |
| | Moment (Nm) | 5.6E+19 | | 3.3E+20 |
| | M_W | 7.1 | | 7.6 |
| Asperity-4 | Area (km ²) | 715 | | 409 |
| | Stress Drop (MPa) | 24.6 | | 21.9 |
| | Moment (Nm) | 2.8E+19 | | 1.82E+19 |
| | M_W | 6.9 | | 6.8 |
| Background | Area (km ²) | 27,980 | | 11,770 |
| | Stress Drop (MPa) | 2.4 | | 2.4 |
| | Moment (Nm) | 4.6E+21 | | 1.3E+21 |
| | M_W | 8.4 | | 8.0 |

表 4-2: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)の断層パラメータ⁴⁾.

| | | | | | |
|------------|-------------------------|-----------|---------|---------|-----------|
| Whole | Area (km ²) | 110,150 | | | |
| | Moment (Nm) | 3.4E+22 | | | |
| | M_w | 9.0 | | | |
| | Segment Name | Hyuganada | Nankai | Tokai | Surugawan |
| SMGA-1 | Area (km ²) | 1,018 | 1,953 | 910 | 438 |
| | Stress Drop (MPa) | 34.5 | 46.4 | 45.4 | 34.4 |
| | Moment (Nm) | 4.6E+20 | 1.6E+21 | 5.1E+20 | 1.3E+20 |
| | M_w | 7.7 | 8.1 | 7.7 | 7.3 |
| SMGA-2 | Area (km ²) | 1,029 | 1,615 | 914 | 415 |
| | Stress Drop (MPa) | 34.5 | 46.4 | 45.4 | 34.4 |
| | Moment (Nm) | 4.7E+20 | 1.2E+21 | 5.1E+20 | 1.2E+20 |
| | M_w | 7.7 | 8.0 | 7.7 | 7.3 |
| SMGA-3 | Area (km ²) | | 1,612 | 913 | |
| | Stress Drop (MPa) | | 46.4 | 45.4 | |
| | Moment (Nm) | | 1.2E+21 | 5.1E+20 | |
| | M_w | | 8.0 | 7.7 | |
| SMGA-4 | Area (km ²) | | 929 | 924 | |
| | Stress Drop (MPa) | | 46.4 | 45.4 | |
| | Moment (Nm) | | 5.4E+20 | 5.2E+20 | |
| | M_w | | 7.8 | 7.7 | |
| Background | Area (km ²) | 17,006 | 47,681 | 25,758 | 7,035 |
| | Stress Drop (MPa) | 3.7 | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| | Moment (Nm) | 3.4E+21 | 1.6E+22 | 6.2E+21 | 9.0E+20 |
| | M_w | 8.3 | 8.7 | 8.5 | 7.9 |

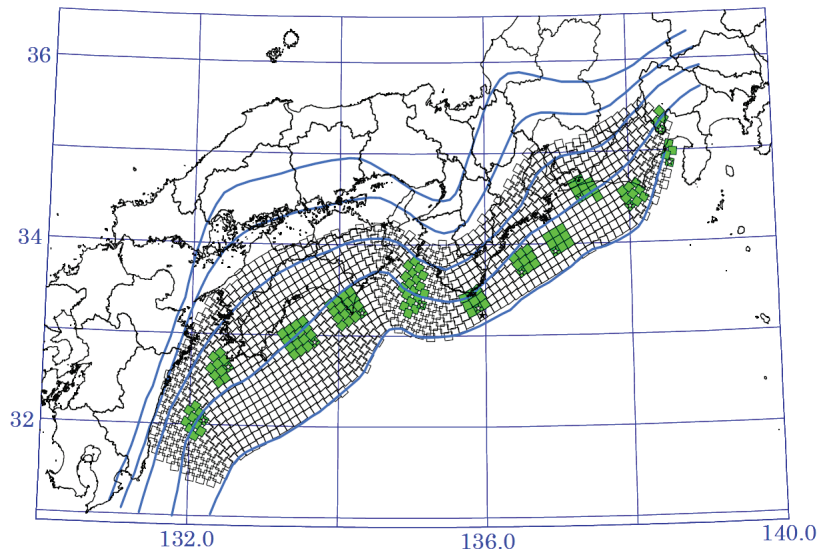


図 4-3: 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース)の SMGA・背景領域位置⁴⁾.

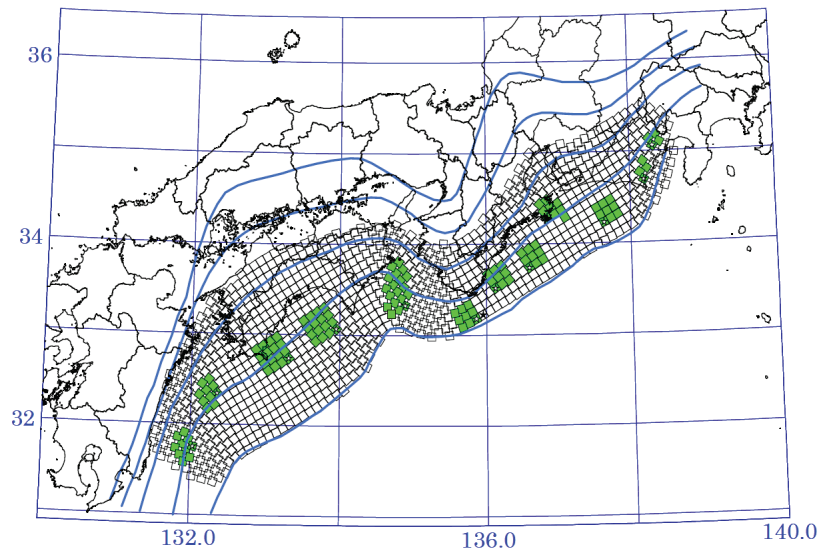


図 4-4: 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース)の SMGA・背景領域位置⁴⁾.

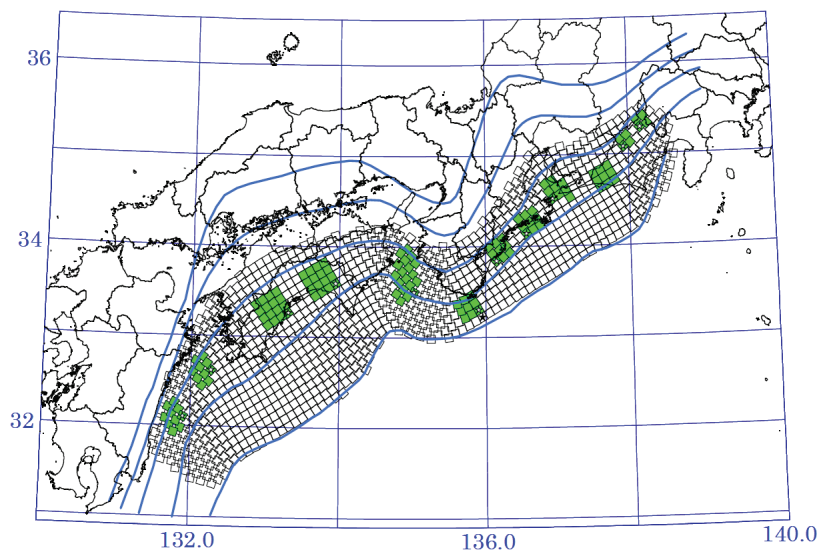


図 4-5: 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)の SMGA・背景領域位置⁴⁾.

4.2.2 地震動推定対象地点

地震動作成の対象地点として、徳島県内にある K-NET（独立行政法人防災科学技術研究所 強震観測網）観測点から鳴門（TKS001）・阿南（TKS003）・牟岐（TKS006）の3地点（図 4-6）を選んだ。K-NET 観測点を選択したのは、過去の中小地震の地震波形が数多く記録されていることで、サイト位相特性評価に使える波形が豊富なためである。これらの地点における工学的基盤での地震動を作成するには、地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性・位相特性の情報が必要である。

地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性については、野津・長尾(2005)⁶⁾によって求められている K-NET 各観測点の地震基盤～地表の増幅特性から、工学的基盤～地表のサイト増幅特性を取り除くことにより求める。K-NET 各観測点の地表から GL-20m までのボーリング情報は K-NET のホームページ⁷⁾に公開されている。それによると、K-NET 阿南（TKS003）では GL-12m で $V_s = 740$ m/s の岩盤があり、K-NET 牟岐（TKS006）では GL-16m で $V_s = 450$ m/s の礫質土の層に到達するため、ここを工学的基盤に設定した。一方で K-NET 鳴門（TKS001）では GL-20m まで $V_s = 170$ m/s の粘土層が続いており、工学的基盤はこれより深い場所に設定する必要がある。K-NET 地点のボーリング情報では GL-20m 以深については分からないため、国土交通省・独立行政法人土木研究所・独立行政法人港湾空港技術研究所が共同で運営している国土地盤情報検索サイト”KuniJiban”⁸⁾において公開されている K-NET 鳴門から約 2 km 離れた神戸淡路鳴門自動車道撫養高架橋下部工のボーリングデータを用いた。ボーリングデータによると、平均 TP-30m で岩盤、それより上はシルト層であったことから、K-NET 鳴門（標高 2.0 m）では GL-20m から GL-32m までをシルト層、それ以深を岩盤と仮定して GL-32m を工学的基盤に設定した。工学的基盤～地表のサイト増幅特性は、多層地盤の次元重複反射理論⁹⁾で求めた。各地点の地震基盤～地表、工学的基盤～地表、地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性を図 4-7 に示す。

サイト位相特性を示す地震動としては、2.4.2 と同様に古和田他(1998)¹⁰⁾の手法で中小地震の観測記録を用いた。ただし、ここでは工学的基盤を対象とすることから上で評価した工学的基盤～地表のサイト特性を使って工学的基盤に戻した時刻歴波形を用いた。

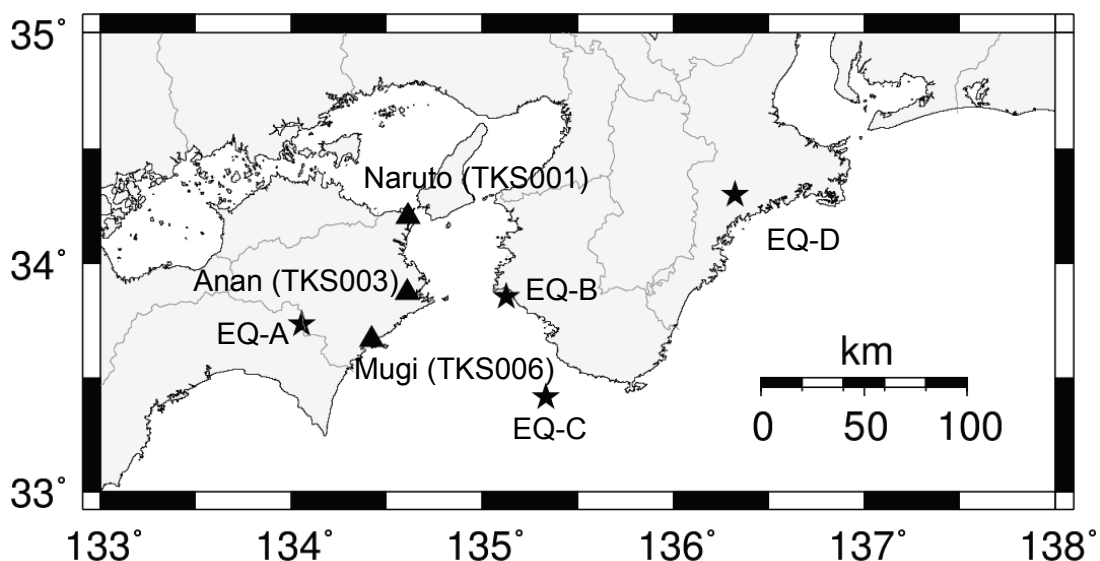


図 4-6: 地震動推定対象とする3地点とグリーン関数の位相特性評価に使用した中小地震の震央位置。

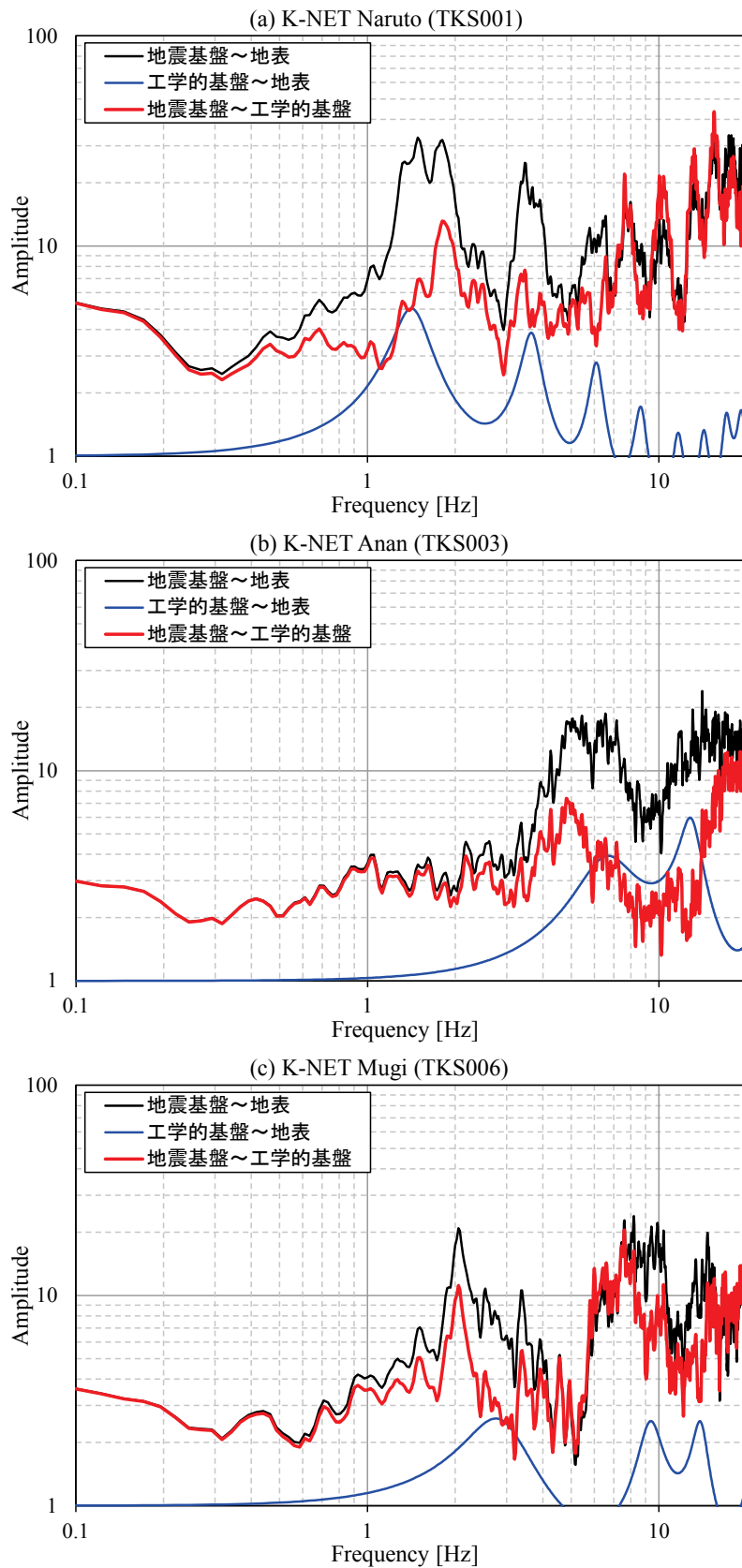


図 4-7: 地震基盤～地表, 地震基盤～工学的基盤, 工学的基盤～地表のサイト増幅特性. (a) K-NET 鳴門 (TKS001), (b) K-NET 阿南 (TKS003), (c) K-NET 牟岐 (TKS006).

4.2.3 統計的グリーン関数法による波形合成

2.4.2 で説明した統計的グリーン関数法を用いて対象3地点の工学的基盤における水平2成分の地震動波形の合成を行う。中央防災会議モデル(2003)・巨大地震検討会モデル(2012)ともに1つの要素は約10km四方の小断層に分割されており、長さ方向・幅方向にはこれ以上分割して計算する必要がない。時間方向には小断層の応力降下量と面積から式 2-7¹¹⁾により小地震のモーメントを求め、この値でモデルで与えられた小断層の地震モーメントを割ることで分割数を求めた。

グリーン関数の位相特性を決めるための中小地震は、アスペリティ・SMGA と入射角および方位角が類似したものをを用いる観点から、表 4-3・図 4-6 に示す中小地震の地震波形を、中央防災会議モデル(2003)については表 4-4、巨大地震検討会モデル(2012)については表 4-5 に示すアスペリティ・SMGA または背景領域に適用した。K-NET 鳴門では EQ-C の記録が、K-NET 牟岐では EQ-D の記録が得られていないことから、それぞれ EQ-B、EQ-C を代わりに用いた。 Q_s 値は、川瀬・松尾(2004)¹²⁾によるインバージョン解析で求められた全国6領域の地震タイプごとの Q_s 値(図 2-11・表 2-4)のうち、領域4のプレート間での値を用いた。巨大地震検討会モデル(2012)では、計算対象地点の近傍に SMGA が存在する。断層近傍では地震動の強さが飽和する現象が起きるため、震源直上等では $1/(R+C)$ (R : 断層最短距離, C : 定数) で地震波の振幅が減衰するとして強震波形を計

表 4-3: 統計的グリーン関数法で位相特性評価に使用する中小地震。

| Name | EQ-A | EQ-B | EQ-C | EQ-D |
|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Origin Time | 2010/09/02 17:42:52.75 | 2005/11/23 22:24:20.71 | 2001/10/02 21:14:21.80 | 2000/10/31 01:42:52.98 |
| Latitude (deg) | 33.735 | 33.855 | 33.418 | 34.299 |
| Longitude (deg) | 134.055 | 135.127 | 135.331 | 136.322 |
| Depth (km) | 21.5 | 27.8 | 25.5 | 38.7 |
| Magnitude | 3.7 | 4.0 | 4.6 | 5.7 |
| Region Name | Tokushima Pref. | Central Wakayama Pref. | S. off Kii Peninsula | Shima Peninsula Region |
| Naruto (TKS001) | ○ | ○ | | ○ |
| Anan (TKS003) | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Mugi (TKS006) | ○ | ○ | ○ | |

表 4-4: 中央防災会議モデル(2003)の各アスペリティ・背景領域の波形合成で適用する中小地震。

| | | Naruto (TKS001) | Anan (TKS003) | Mugi (TKS006) |
|------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|
| Nankai Segment | Asperity 1 | EQ-A | EQ-A | EQ-A |
| | Asperity 2 | EQ-A | EQ-A | EQ-A |
| | Asperity 3 | EQ-B | EQ-B | EQ-B |
| | Asperity 4 | <u>EQ-B</u> | EQ-C | EQ-C |
| | Background | EQ-B | EQ-B | EQ-B |
| Tonankai Segment | Asperities | EQ-D | EQ-D | <u>EQ-C</u> |
| | Background | EQ-D | EQ-D | <u>EQ-C</u> |

表 4-5: 巨大地震検討会モデル(2012)の各 SMGA・背景領域の波形合成で適用する中小地震.

| | | Naruto (TKS001) | Anan (TKS003) | Mugi (TKS006) |
|-------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|
| Hyuganada Segment | SMGAs | EQ-A | EQ-A | EQ-A |
| | Background | EQ-A | EQ-A | EQ-A |
| Nankai Segment | SMGA3 | EQ-A | EQ-A | EQ-A |
| | SMGA2 | EQ-A | EQ-A | EQ-A |
| | SMGA1 | EQ-B | EQ-B | EQ-B |
| | SMGA4 | <u>EQ-B</u> | EQ-C | EQ-C |
| | Background | EQ-B | EQ-B | EQ-B |
| Tokai Segment | SMGAs | EQ-D | EQ-D | <u>EQ-C</u> |
| | Background | EQ-D | EQ-D | <u>EQ-C</u> |
| Surugawan Segment | SMGAs | EQ-D | EQ-D | <u>EQ-C</u> |
| | Background | EQ-D | EQ-D | <u>EQ-C</u> |

算することがあるが、定数 C の決め方についてはモデルの検討会でも結論が出ていないため¹³⁾、ここではこれを考慮せず計算を行った。波形合成計算には、野津・菅野(2008)¹⁴⁾のプログラムを元に必要な変更を行ったプログラムを用いた。

4.2.4 波形合成結果

前項で説明した方法で中央防災会議モデル(2003)と巨大地震検討会モデル(2012) (4 ケース) の断層モデルで波形合成した結果について説明する。表 4-6 に水平 2 成分の最大加速度の比較を、図 4-8 から図 4-37 に背景領域も含めた全体の加速度時刻歴波形 (黒) と個別のアスペリティ・SMGA の寄与分を示した加速度時刻歴波形 (赤) (いずれもハイパスフィルタにより 0.1 Hz より低い振動数帯をカットしたもの)、フーリエスペクトル (平滑化のためバンド幅 0.05 Hz の Parzen Window を適用)、加速度応答スペクトル (減衰定数 0.05) を示す。時刻歴波形の時刻原点は地震発生時刻とした。

まず中央防災会議モデル(2003)と巨大地震検討会モデル(2012)の結果を比較すると、巨大地震検討会モデル(2012)はいずれのケースにおいても中央防災会議モデル(2003)よりはるかに大きな地震動となっている。両モデルともアスペリティまたは SMGA で地震動波形のほとんどを説明できており (時刻歴波形の一番上の図で背景領域とアスペリティ・SMGA 全てを考慮した波形 (黒)、背景領域を除いてアスペリティ・SMGA のみで作成した波形 (赤) を重ね描き)、徳島県内の計算対象地点ではこのうち中央防災会議モデル(2003)では南海域の Asperity-3 の後に Asperity-2 が続くことで、巨大地震検討会モデル(2012)では南海域 SMGA 1 の後に同域 SMGA 2 が続くことで大半が説明できる。図示してはいないが、背景領域のみでも数 10 gal 程度の地震動が作成されるが、フーリエ空間上でアスペリティ・SMGA と合成するとほとんどアスペリティ・SMGA のみのものと変わらなくなる。中央防災会議モデル(2003)の南海域 Asperity 2 の M_w が 8.0 で巨大地震検討会モデル(2012)の南海域 SMGA 1 の M_w が 8.1 でモーメントの差が 2 倍程度にも関わらず 2 つのモデルの地震動の大きさがこれほど異なったのは、後者が陸域により近いところに設定されたことに加えて、前者の応力降下量が 24.6 MPa なのに対し後者では 46.4 MPa と設定されたことで 1 つの小地震の破壊時間

が短くなり、短時間に大きな地震波が重ね合わせられたためである。巨大地震検討会モデル(2012)において、徳島県内の計算対象地点でいずれのケースにおいても南海域 SMGA 1 と SMGA 2 で強震動の大部分が説明できたことは、 M_w 9.0 の日向灘域から駿河湾域まで連動したパターンではなく、 M_w 8.7 の南海域単独で発生したとしてもほぼ同程度の強さの地震動となることを示している。

加速度応答スペクトルに関しては、2012年に改訂された道路橋示方書のタイプ I・II 応答スペクトル¹⁵⁾と比較を行う。道路橋示方書では、橋の耐震設計において供用期間中に発生する確率は低い大きな強度を持つ地震動「レベル2地震動」を考慮しなければならないとしており、プレート境界型の大規模な地震を想定したタイプ I と内陸直下型地震を想定したタイプ II の応答スペクトルが設定されている。中央防災会議モデル(2003)では、K-NET 牟岐においてタイプ I スペクトルを一部上回る周期があるもののおおむねタイプ I を超えない程度であった。一方で巨大地震検討会モデル(2012)では、いずれのケースもタイプ I を超えており、基本ケース・東側ケースではタイプ II とほぼ同等、西側ケース・内陸ケースではタイプ II も超える大きさとなっている。西側ケース・内陸ケースでは、 M 8 クラスの地震が直下で起きているようなものであるため、プレート境界型より内陸直下型に近いスペクトルになるものと考えられる。

次に計算対象とした3地点の結果について比較する。両モデルにおいて地震動の大きさは、震源域に近い順に南から K-NET 牟岐 > K-NET 阿南 > K-NET 鳴門となっている。巨大地震検討会モデル(2012)の中では、K-NET 鳴門では陸側ケースが最も厳しく、K-NET 阿南・K-NET 牟岐では西側ケースが最も厳しい結果である。いずれも南海域 SMGA 1 が対象地点に最も近くなるケースである。いずれの波形でも南海域 SMGA 1 の影響が最も大きい。K-NET 牟岐では他2地点と比べて西側ケース以外で南海域 SMGA 2 の寄与が大きく、南海域 SMGA 1 に匹敵するほどの地震動となっている。つまり、K-NET 牟岐では他の2地点と比べて地震動が大きいだけでなく、大きな地震動が30秒以上長く継続することとなる。地震動の継続時間については、次項で考察する。

表 4-6: 中央防災会議モデル(2003)と巨大地震検討会モデル(2012)の各評価地点の工学的基盤における最大加速度比較。

| 評価地点 | 成分 | 中央防災会議 モデル(2003) | 巨大地震検討会モデル(2012) | | | |
|----------------------|----|---------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | | 基本 | 東側 | 西側 | 陸側 |
| K-NET 鳴門 (TKS001) | NS | 165 gal | 744 gal | 686 gal | 814 gal | 1,141 gal |
| | EW | 215 gal | 665 gal | 873 gal | 1,113 gal | 1,027 gal |
| K-NET 阿南 (TKS003) | NS | 230 gal | 958 gal | 664 gal | 1,121 gal | 1,032 gal |
| | EW | 220 gal | 789 gal | 671 gal | 1,377 gal | 996 gal |
| K-NET 牟岐 (TKS006) | NS | 475 gal | 1,064 gal | 1,229 gal | 1,917 gal | 1,055 gal |
| | EW | 521 gal | 1,156 gal | 1,040 gal | 2,183 gal | 1,191 gal |

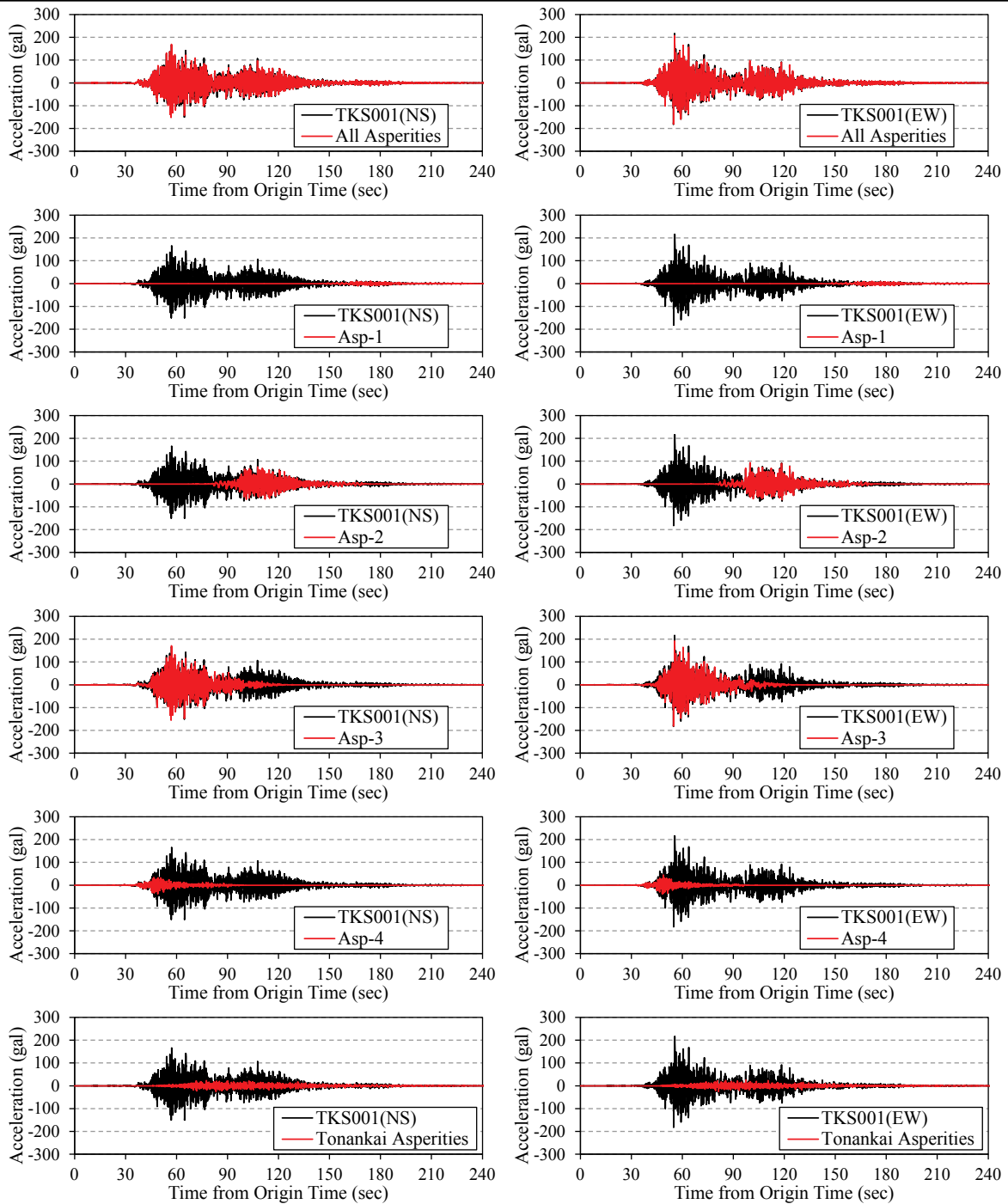


図 4-8: 中央防災会議モデル(2003)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 鳴門:TKS001). 全てのアスペリティと背景領域を含めた波形(黒)と個別のアスペリティによる寄与(赤).

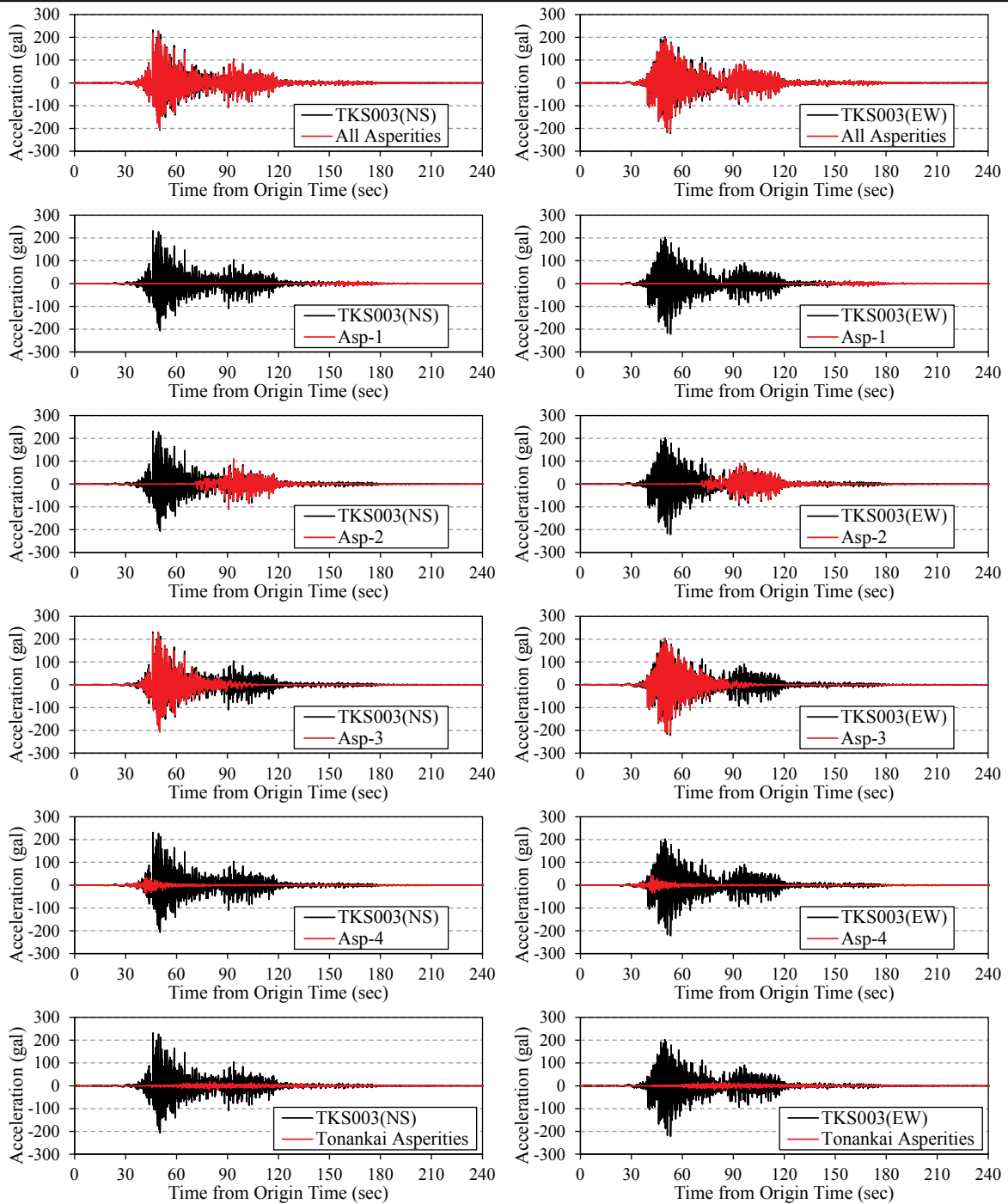


図 4-9: 中央防災会議モデル(2003)による水平2成分の合成波形(K-NET 阿南:TKS003). 全てのアスペリティと背景領域を含めた波形(黒)と個別のアスペリティによる寄与(赤).

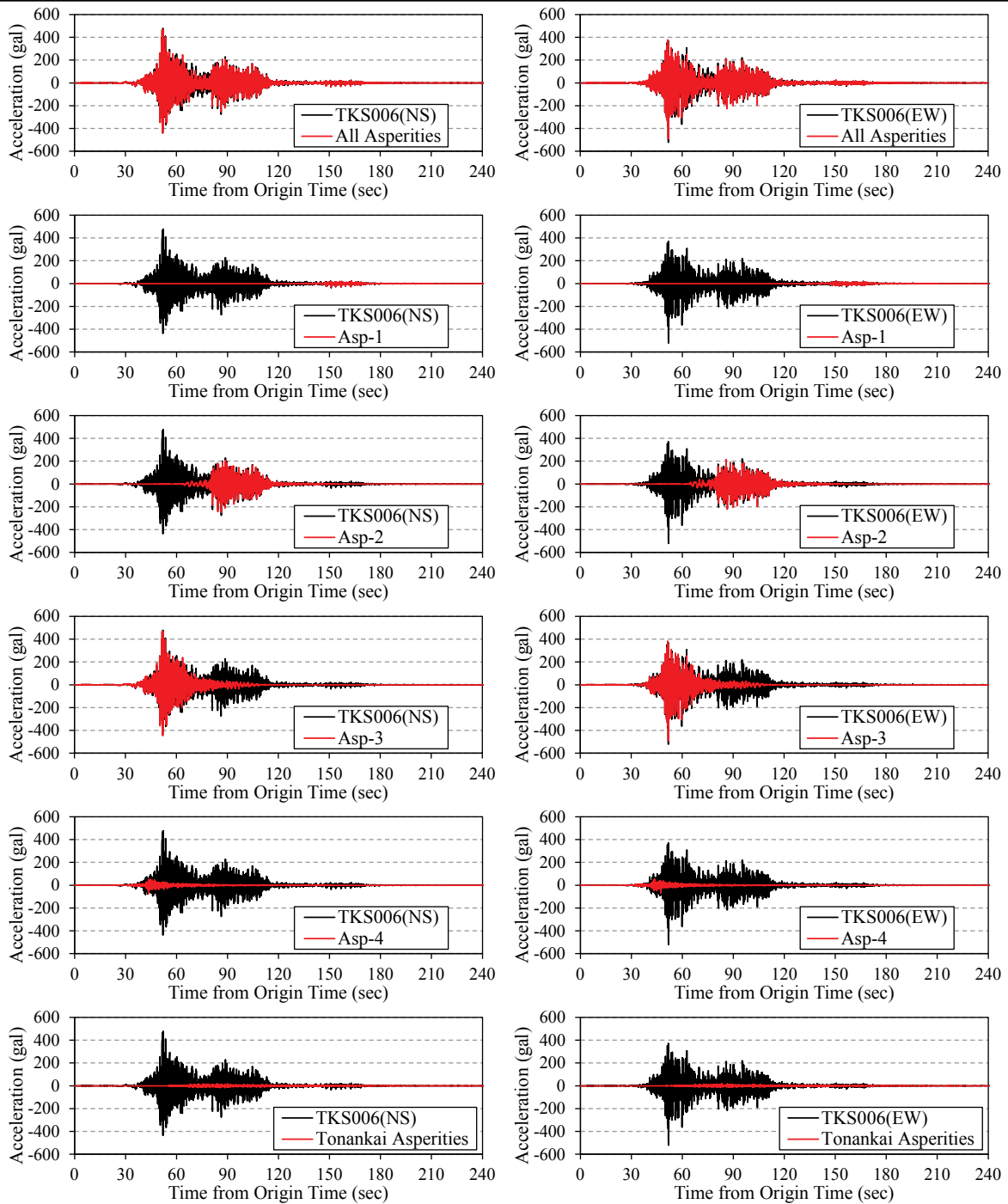


図 4-10: 中央防災会議モデル(2003)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 牟岐:TKS006). 全てのアスペリティと背景領域を含めた波形(黒)と個別のアスペリティによる寄与(赤).

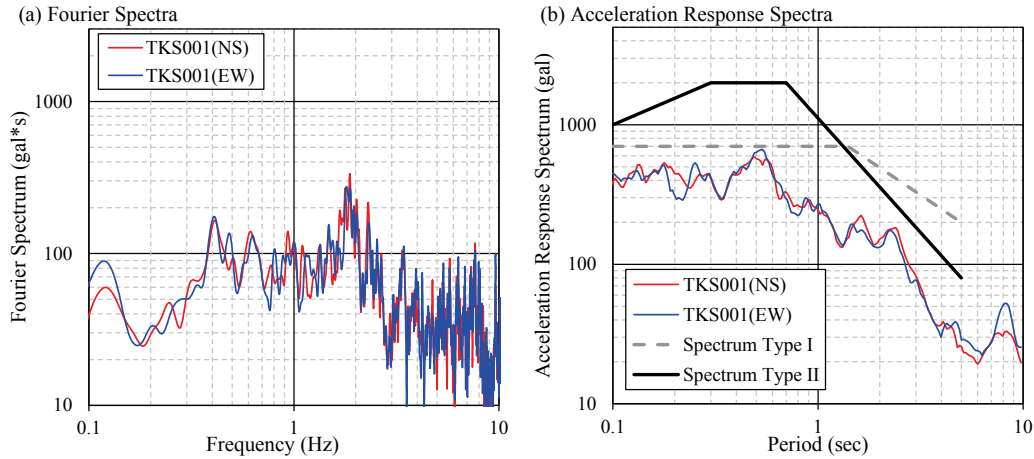


図 4-11: 中央防災会議モデル(2003)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル (K-NET 鳴門:TKS001).

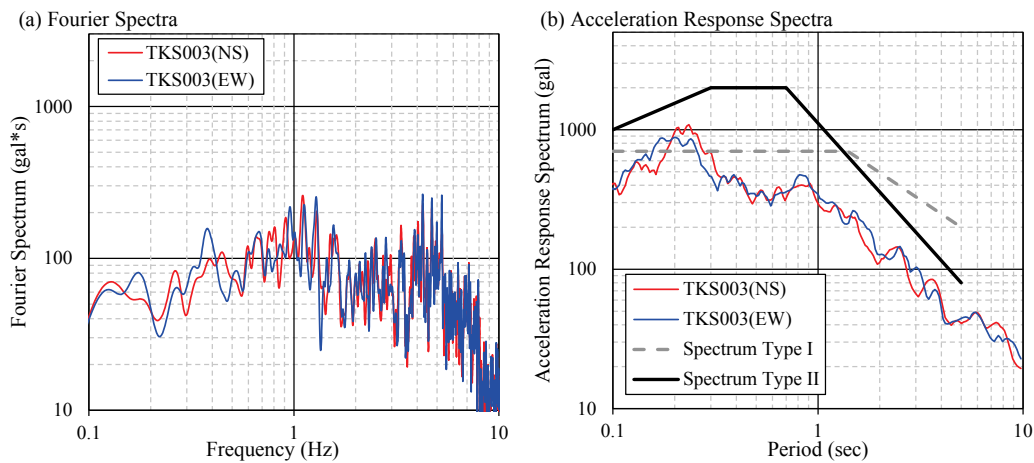


図 4-12: 中央防災会議モデル(2003)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル (K-NET 阿南:TKS003).

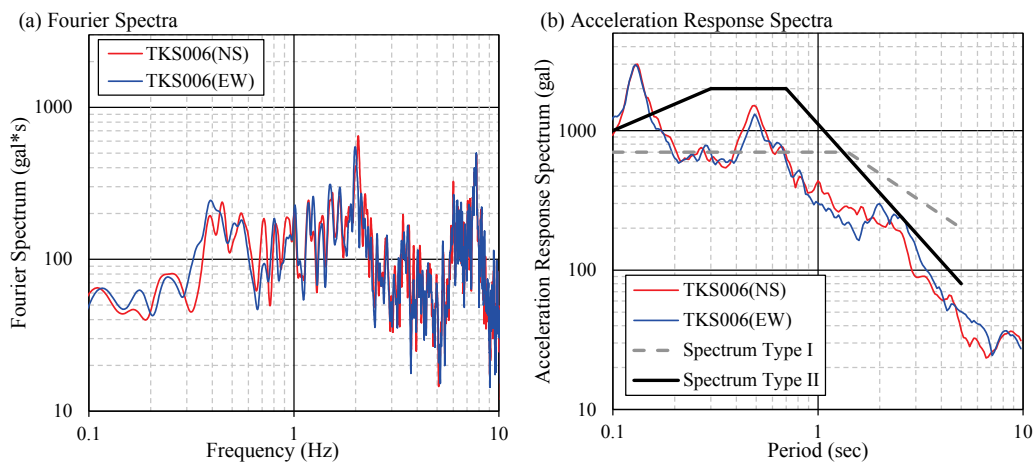


図 4-13: 中央防災会議モデル(2003)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル (K-NET 牟岐:TKS006).

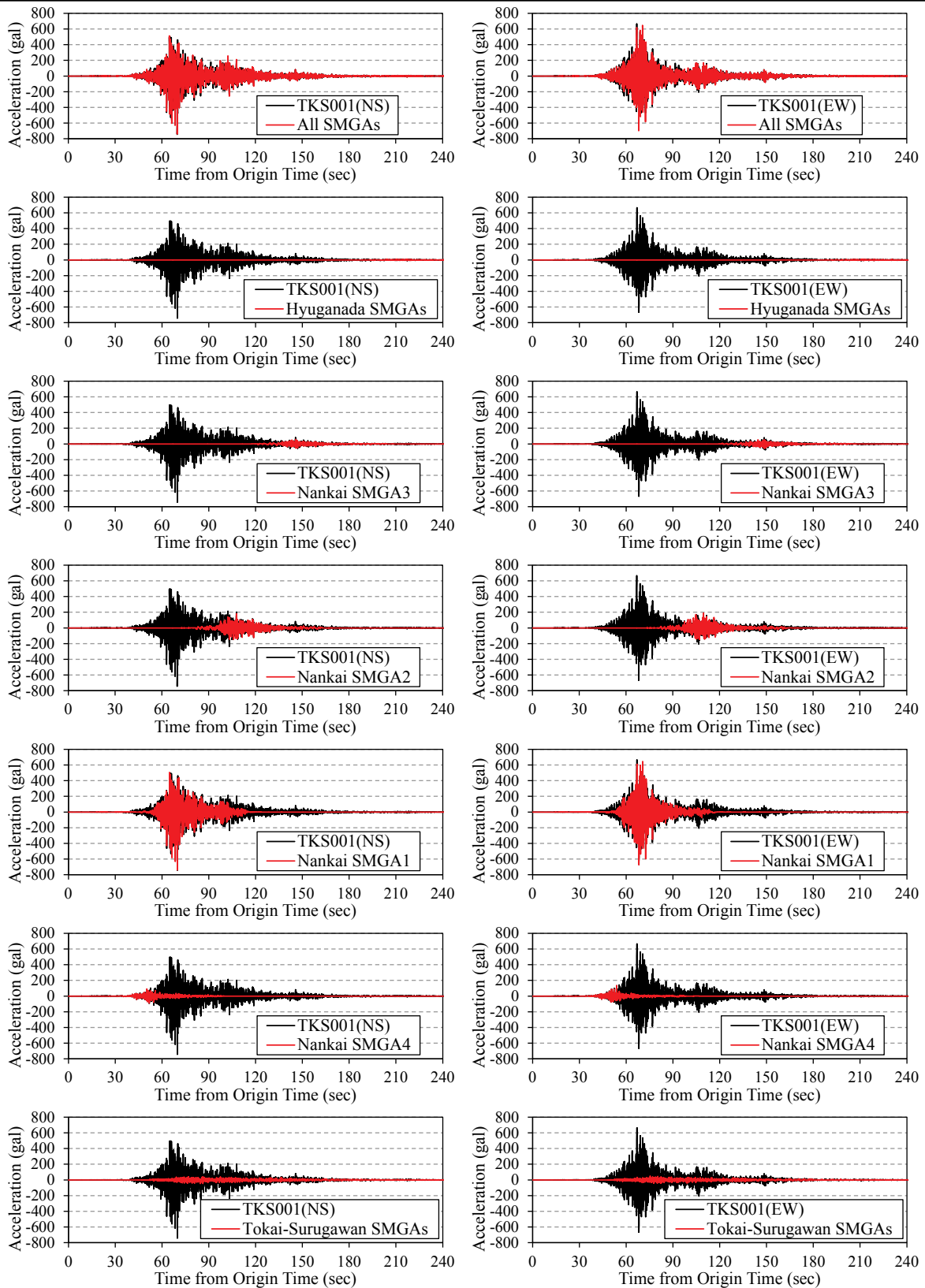


図 4-14: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 鳴門:TKS001).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

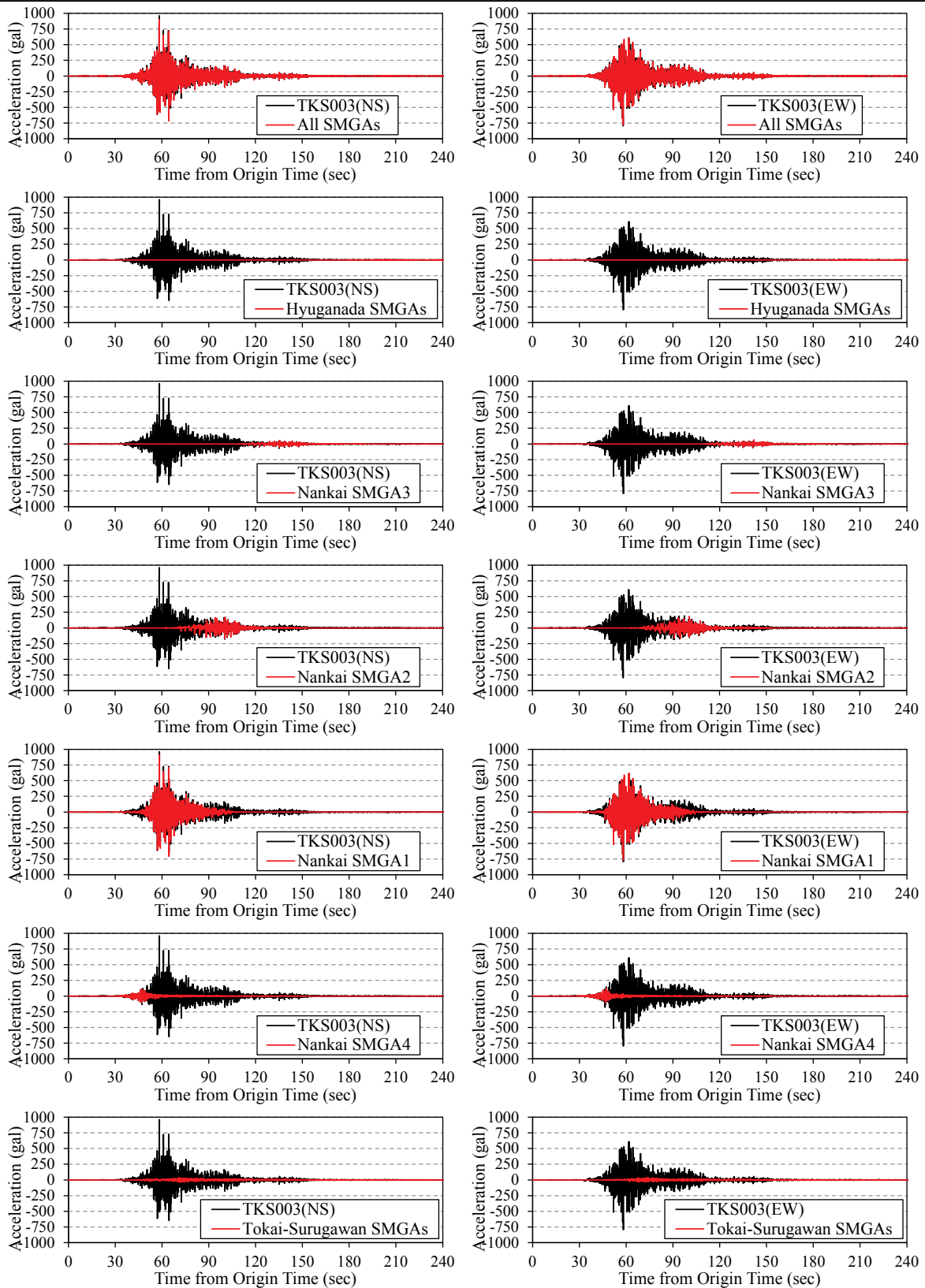


図 4-15: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 阿南:TKS003).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

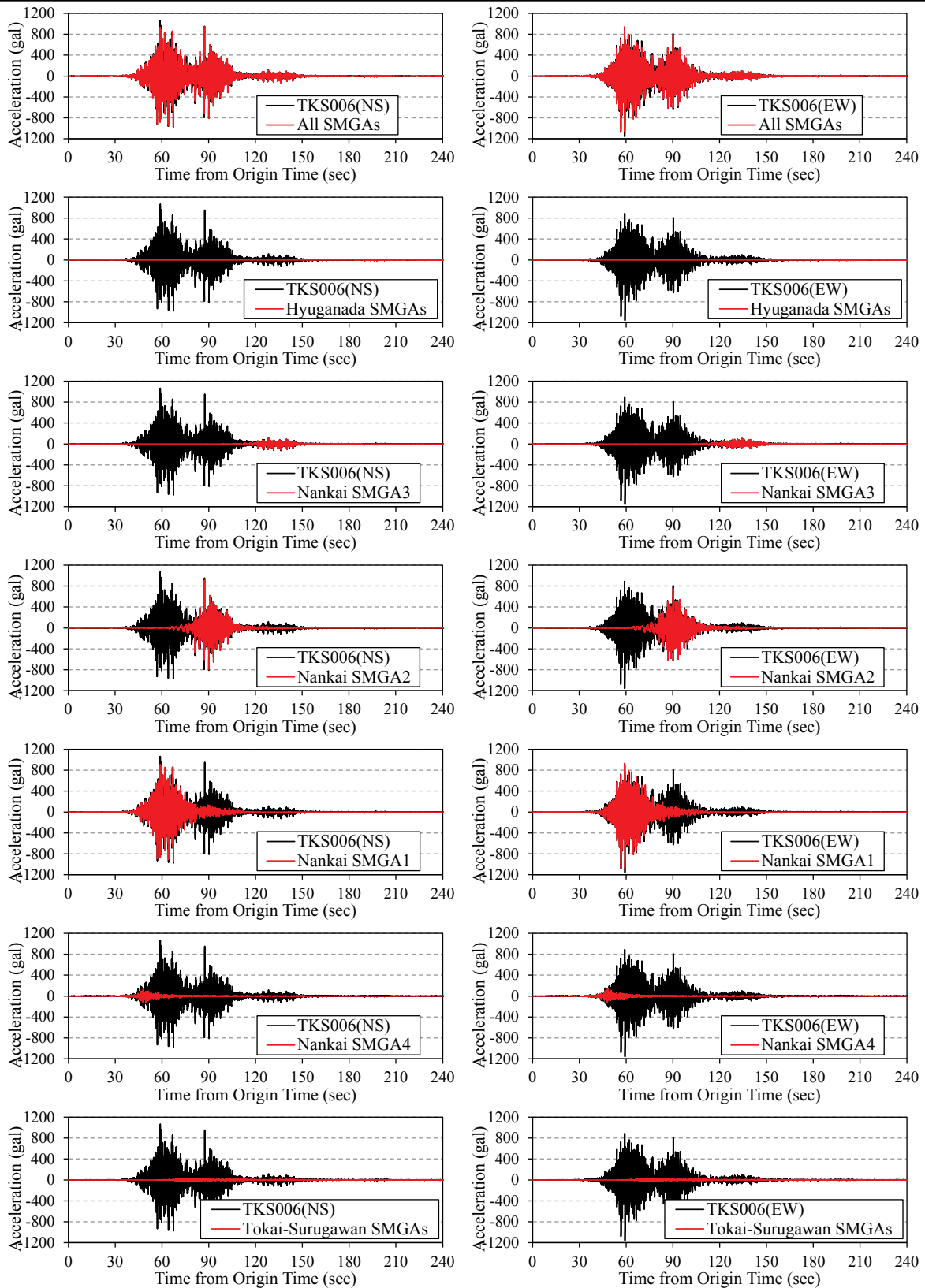


図 4-16: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 牟岐:TKS006).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

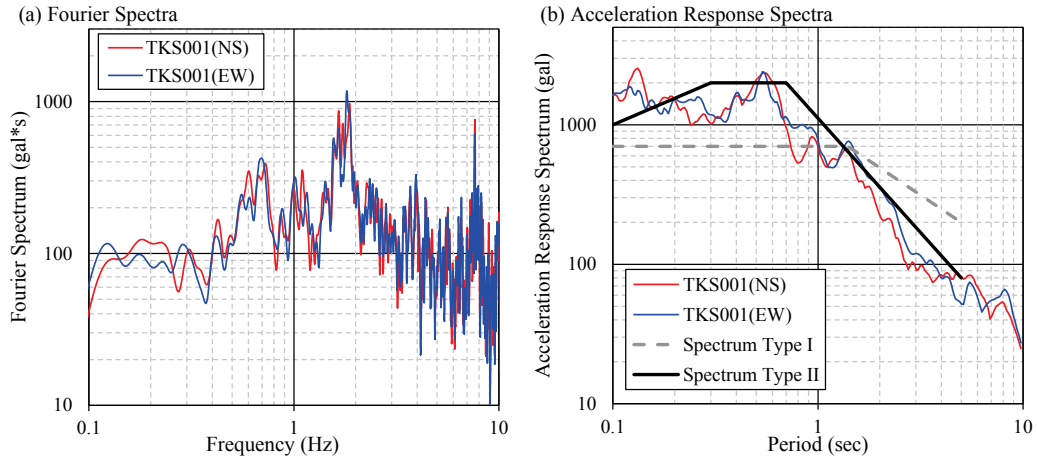


図 4-17: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 鳴門: TKS001).

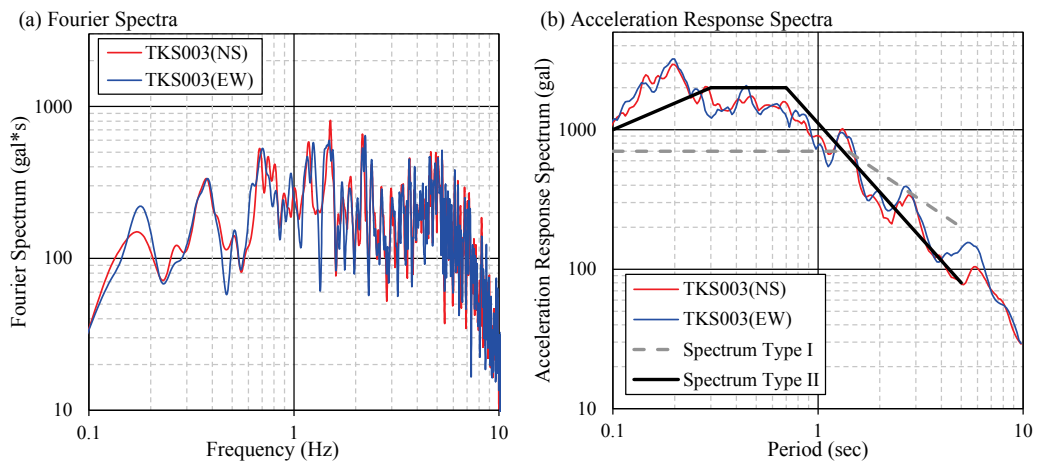


図 4-18: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 阿南: TKS003).

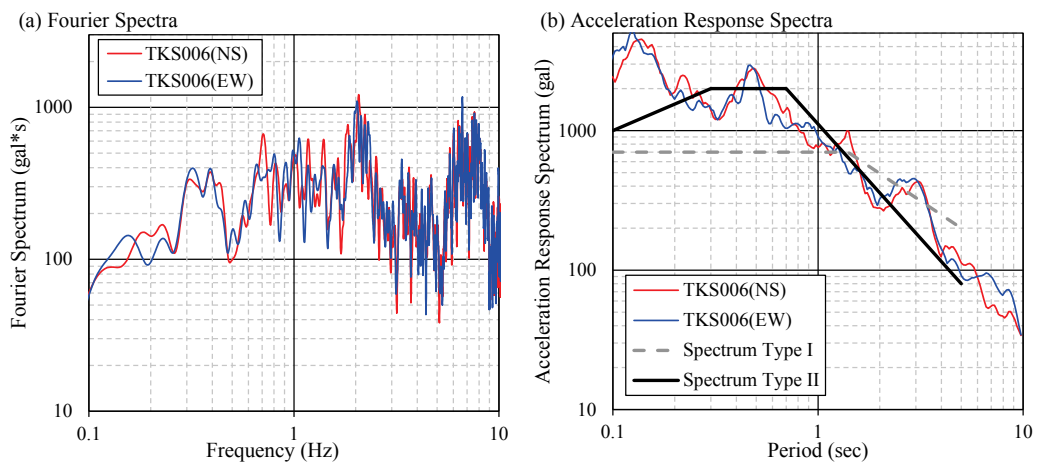


図 4-19: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 牟岐: TKS006).

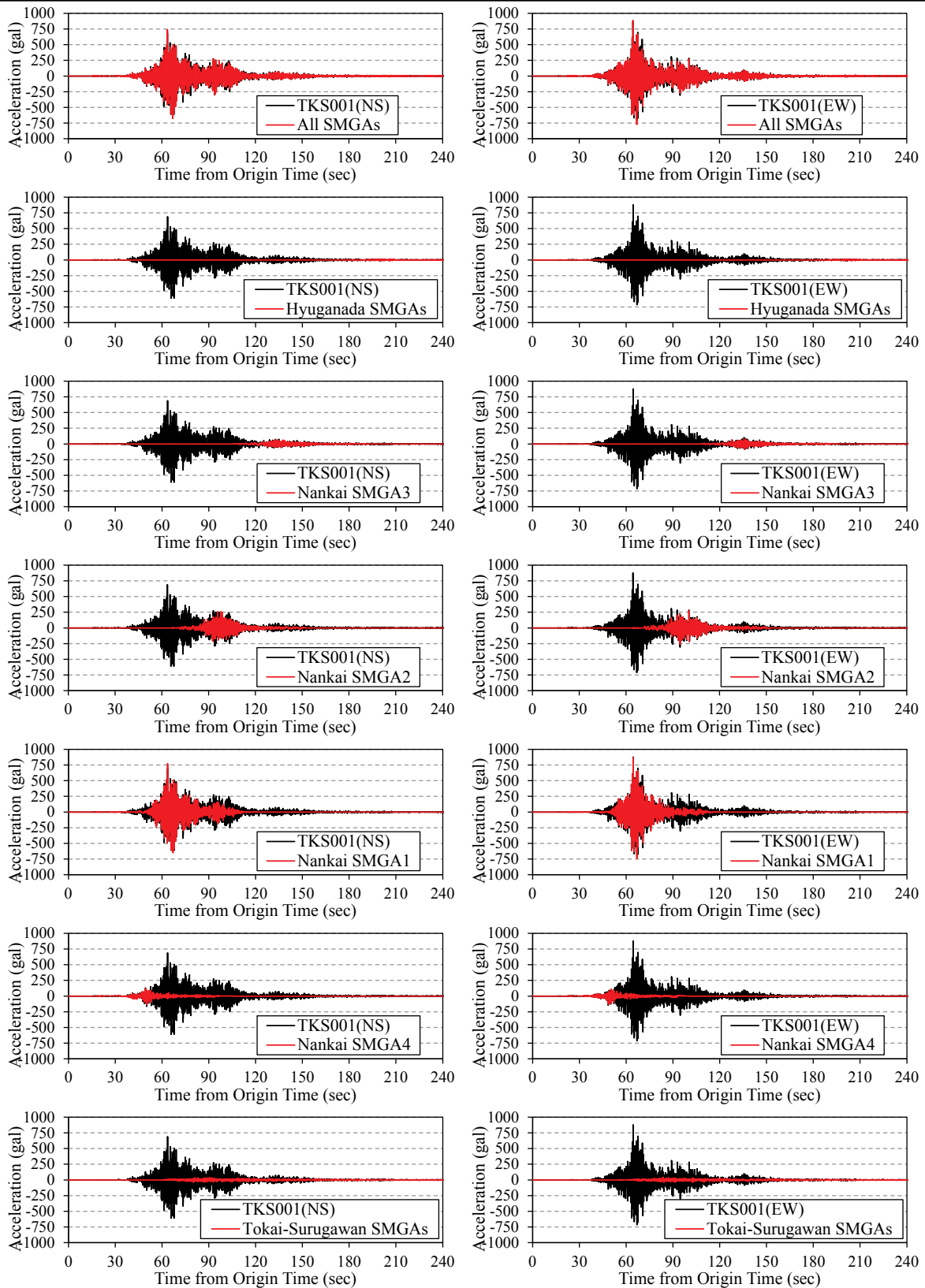


図 4-20: 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 鳴門:TKS001).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

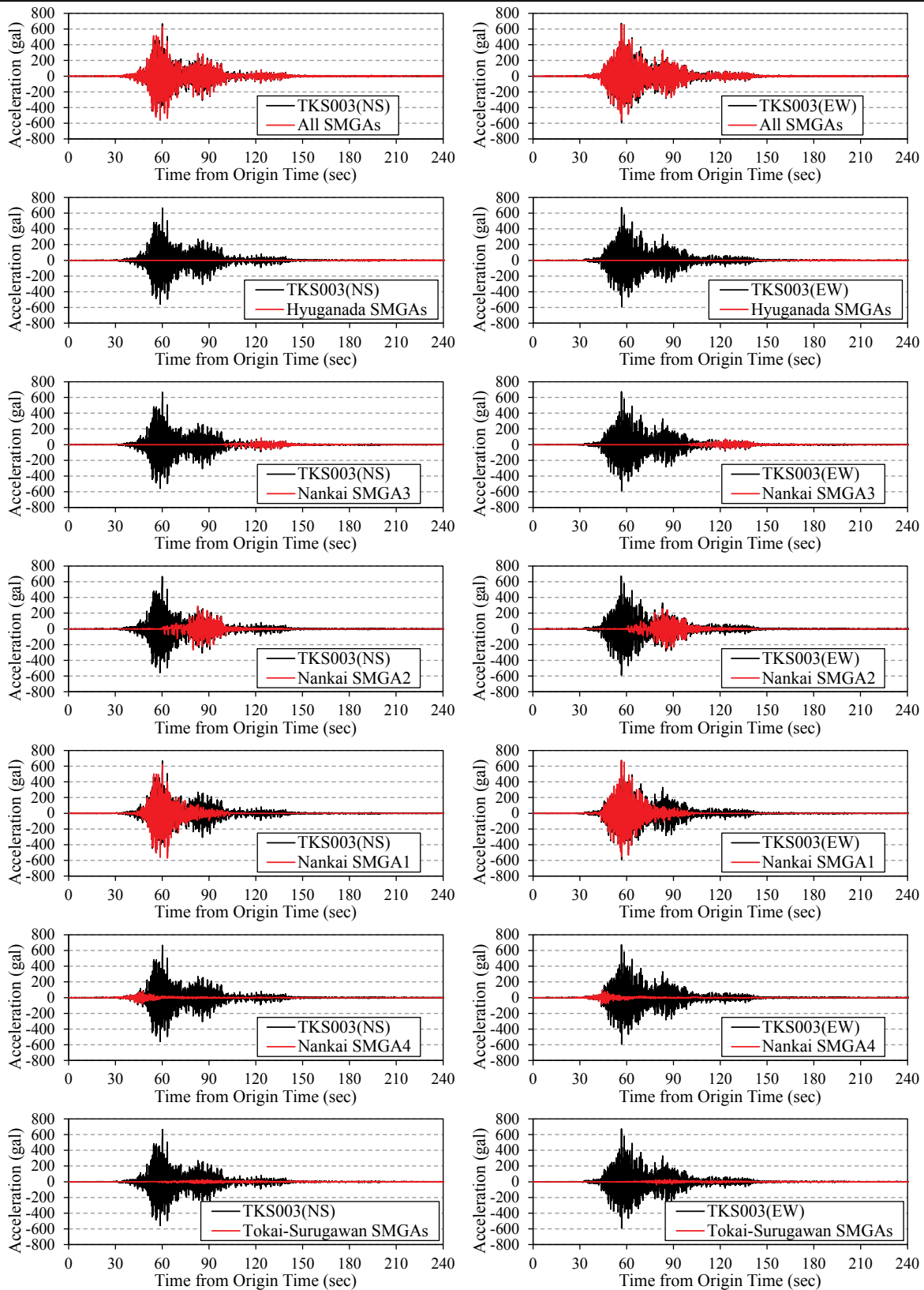


図 4-21: 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 阿南:TKS003).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

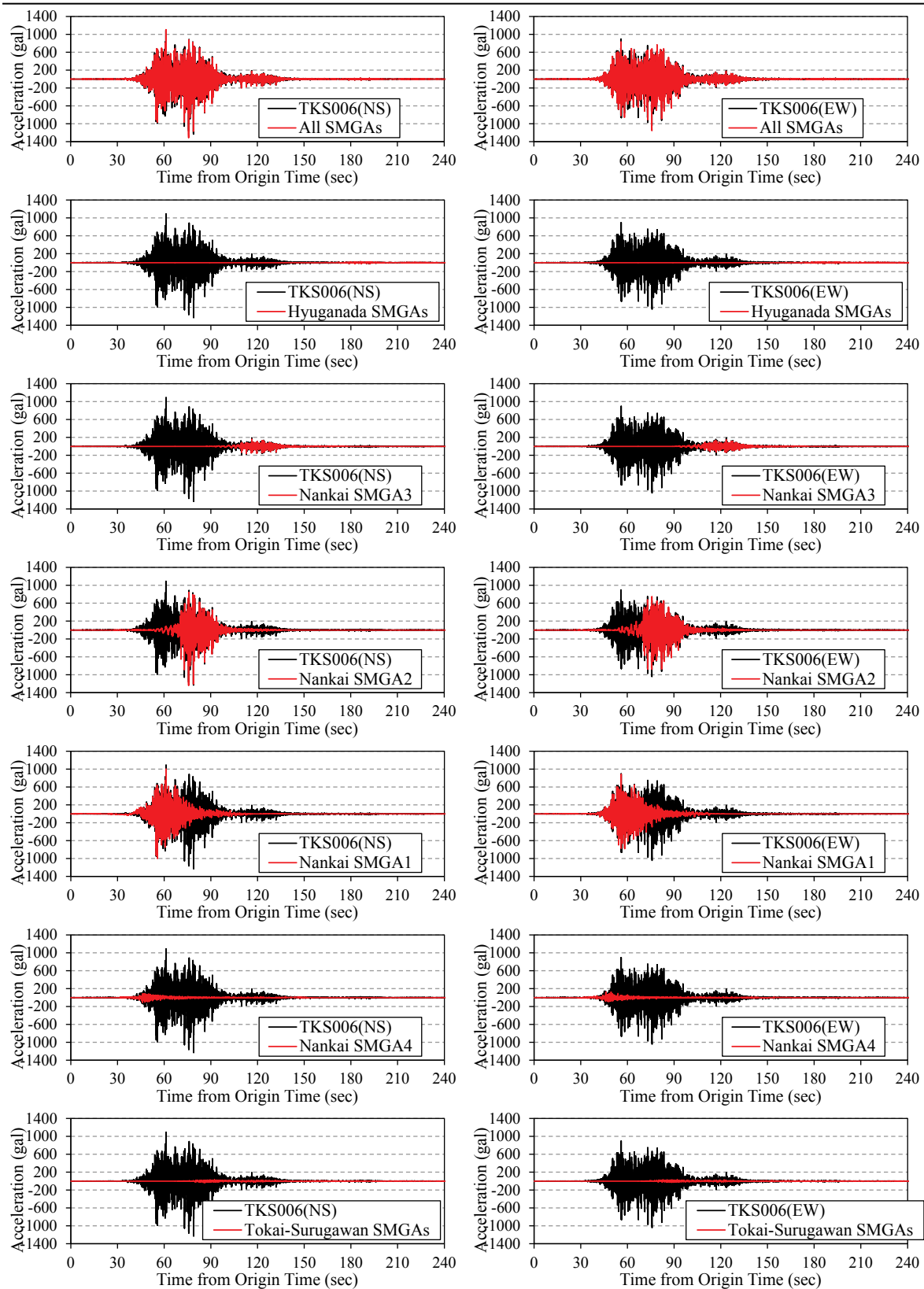


図 4-22: 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 牟岐:TKS006).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

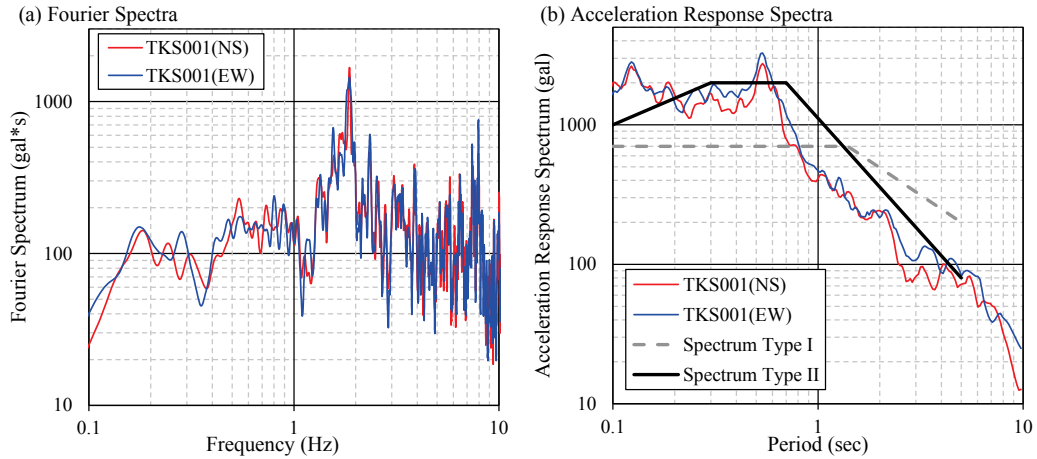


図 4-23: 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 鳴門: TKS001).

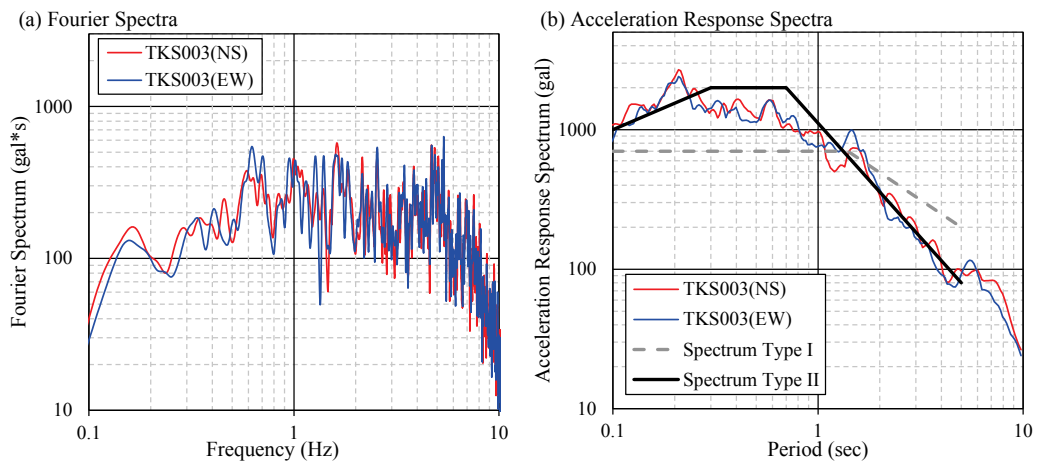


図 4-24: 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 阿南: TKS003).

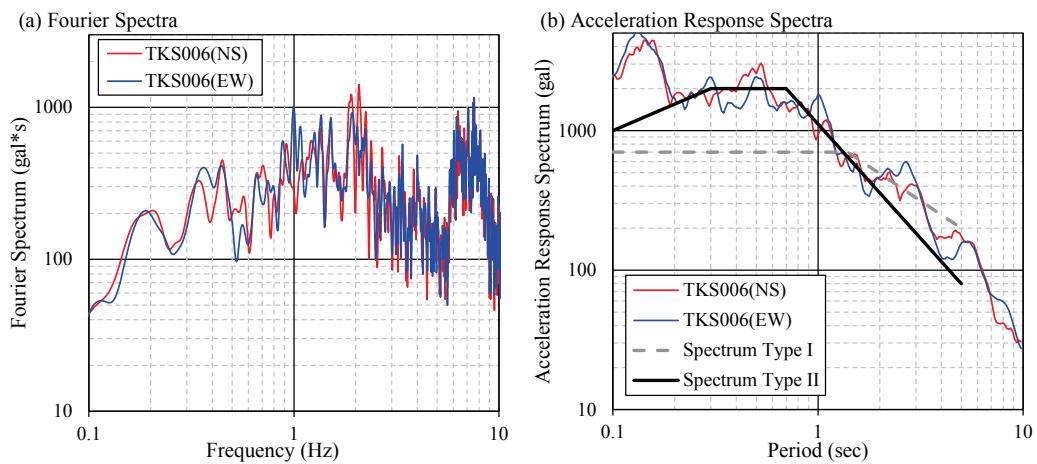


図 4-25: 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 牟岐: TKS006).

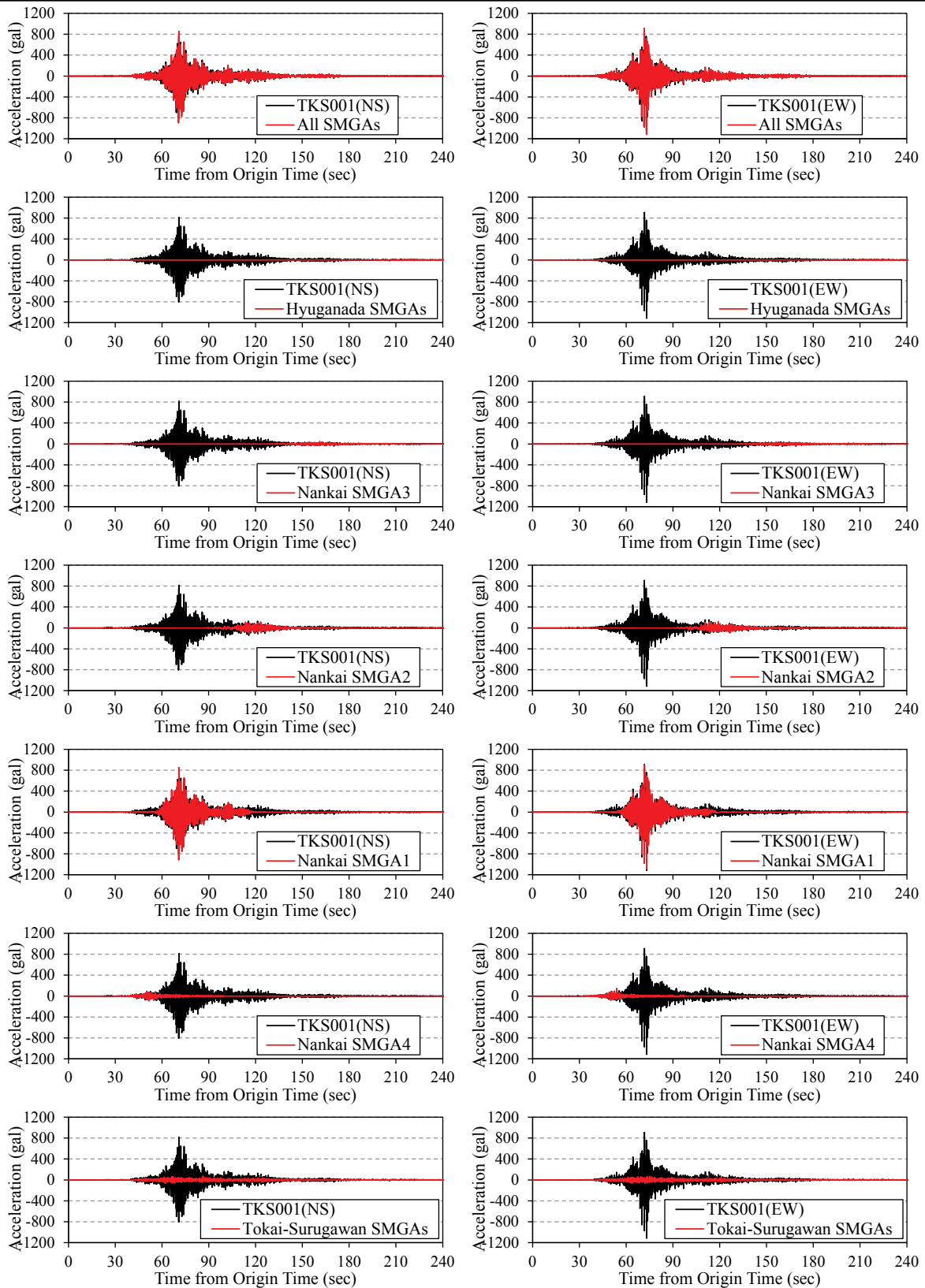


図 4-26: 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 鳴門:TKS001).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

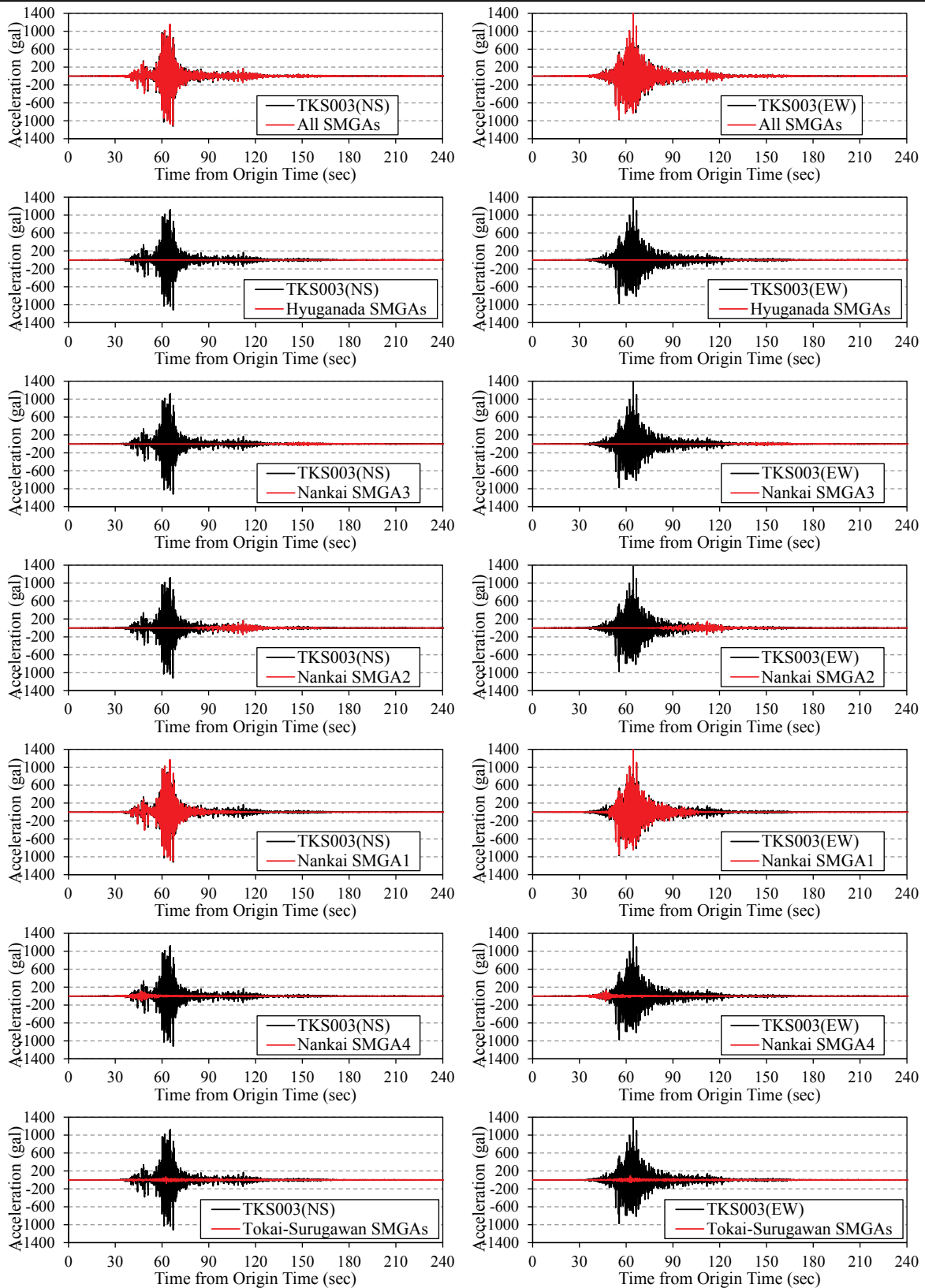


図 4-27: 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 阿南:TKS003).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

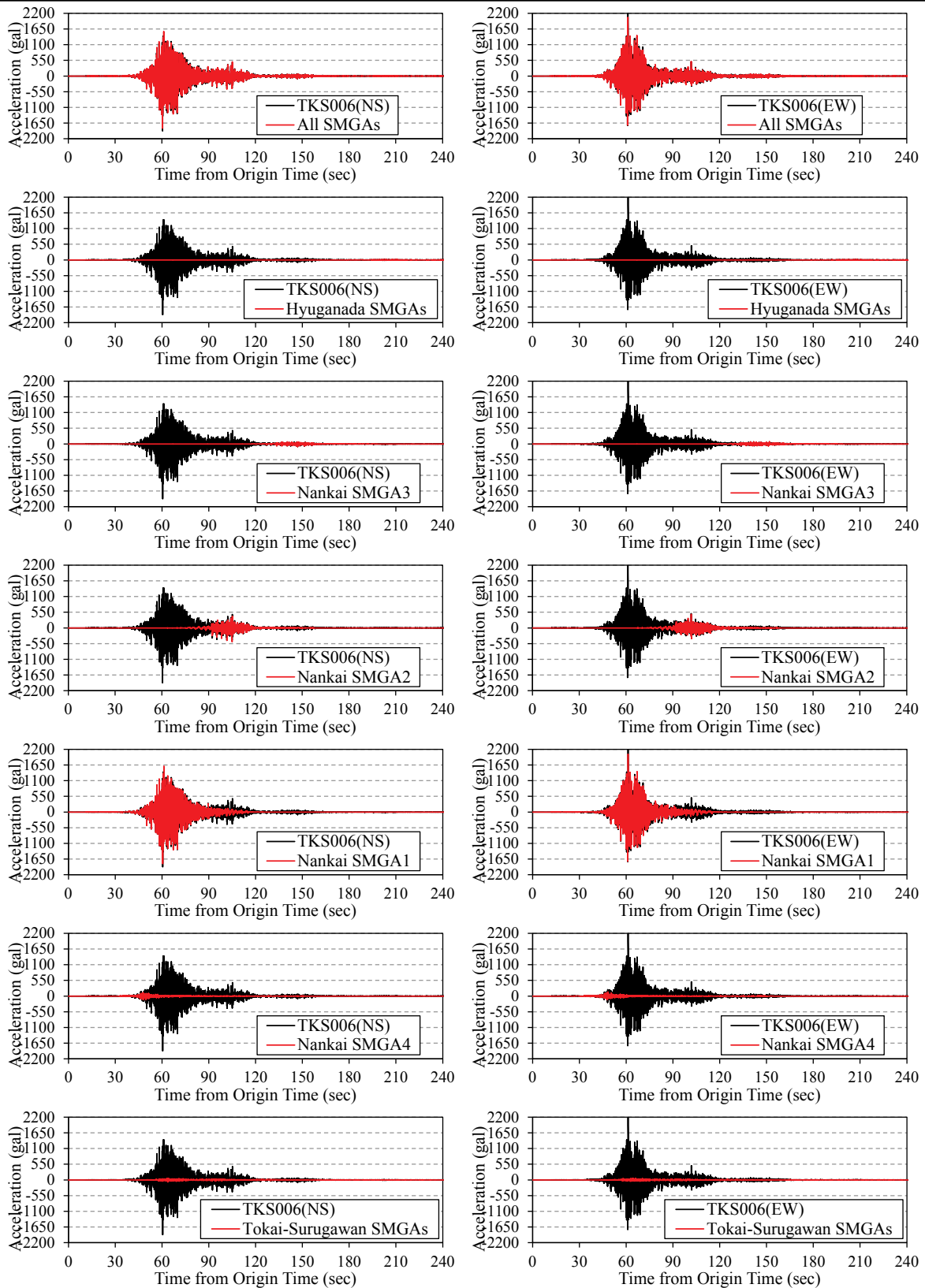


図 4-28: 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 牟岐:TKS006).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

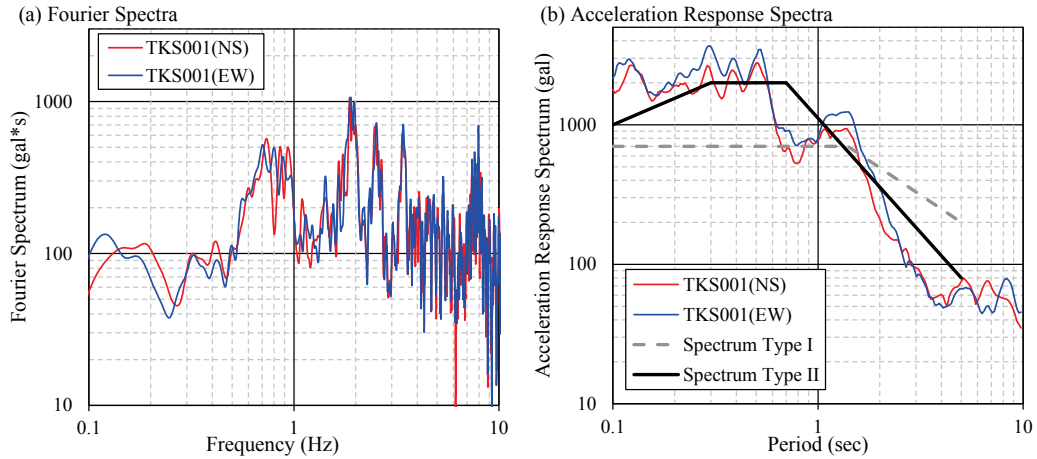


図 4-29: 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 鳴門: TKS001).

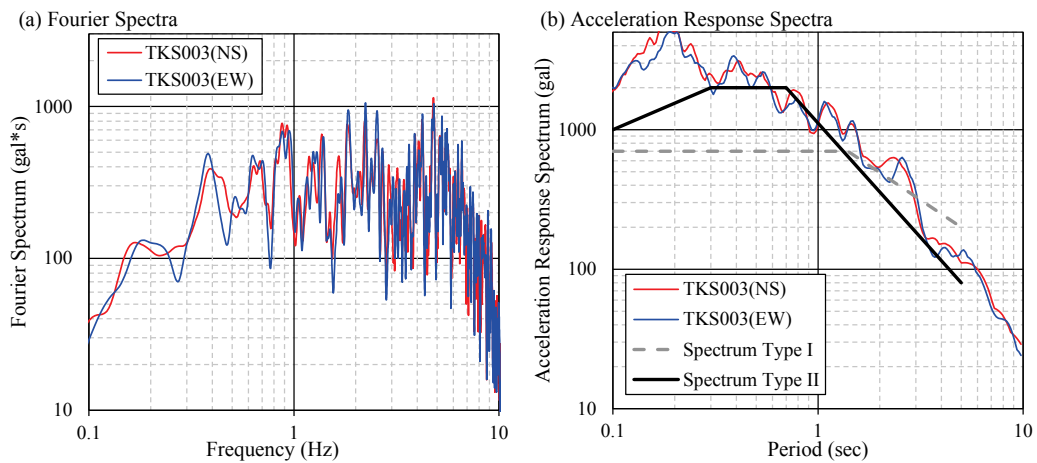


図 4-30: 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 阿南: TKS003).

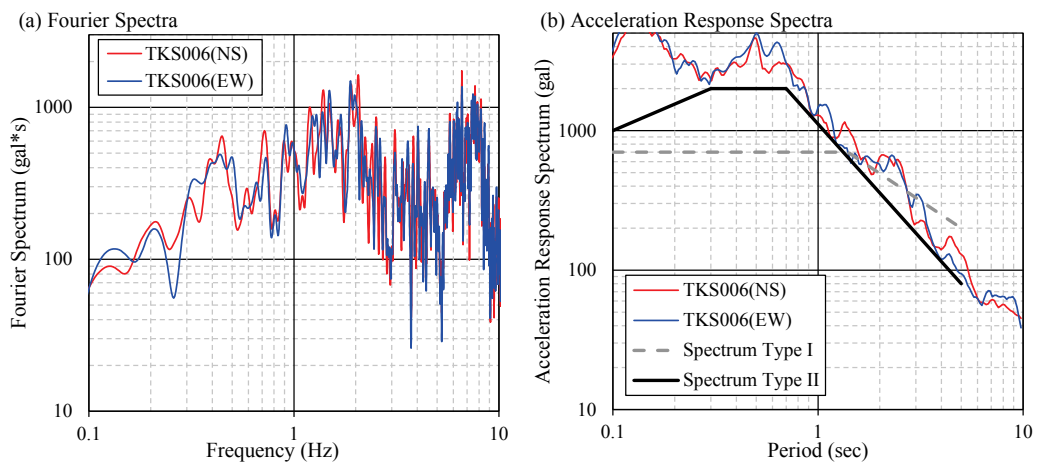


図 4-31: 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 牟岐: TKS006).

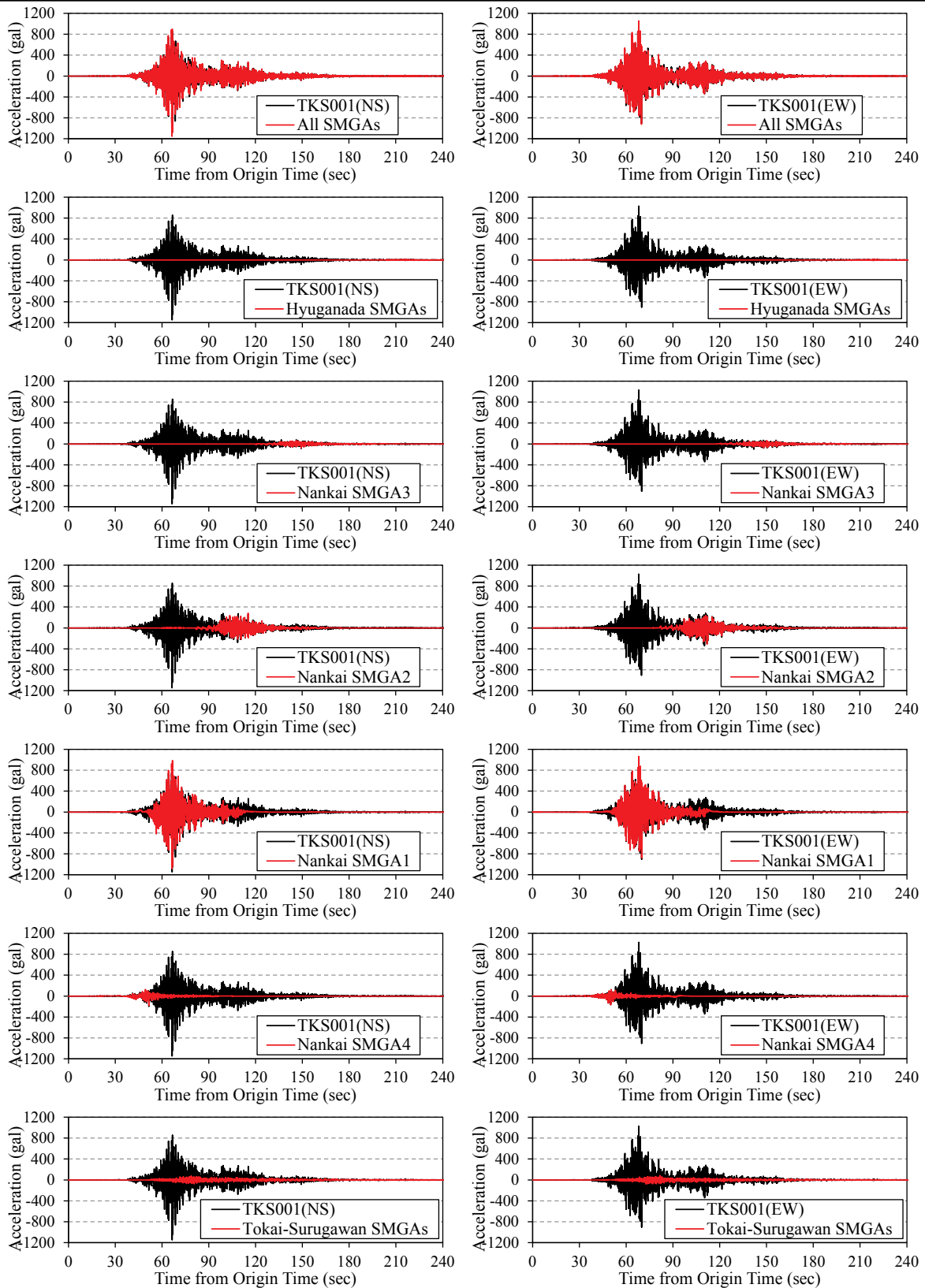


図 4-32: 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 鳴門:TKS001).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

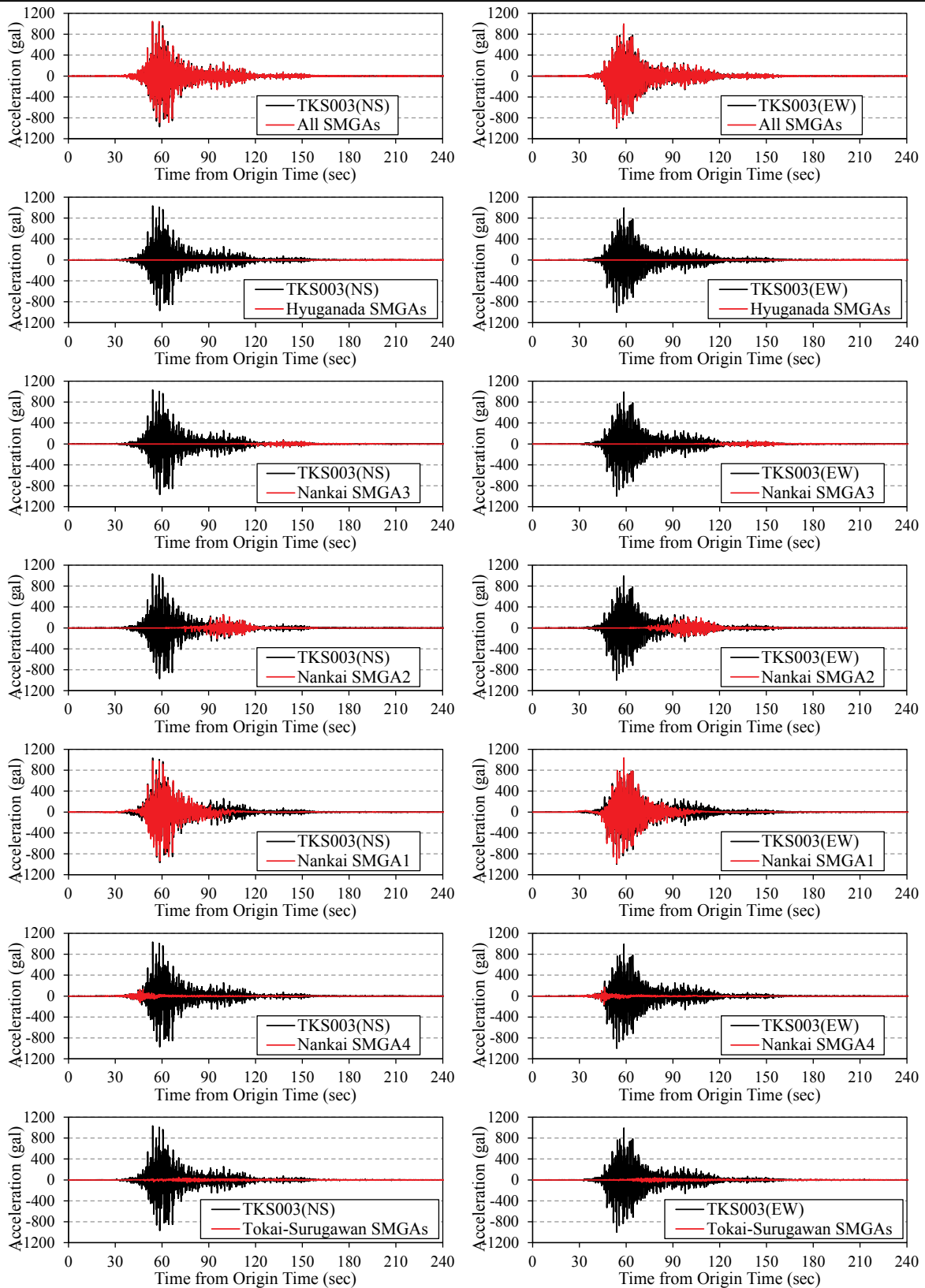


図 4-33: 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 阿南:TKS003). 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

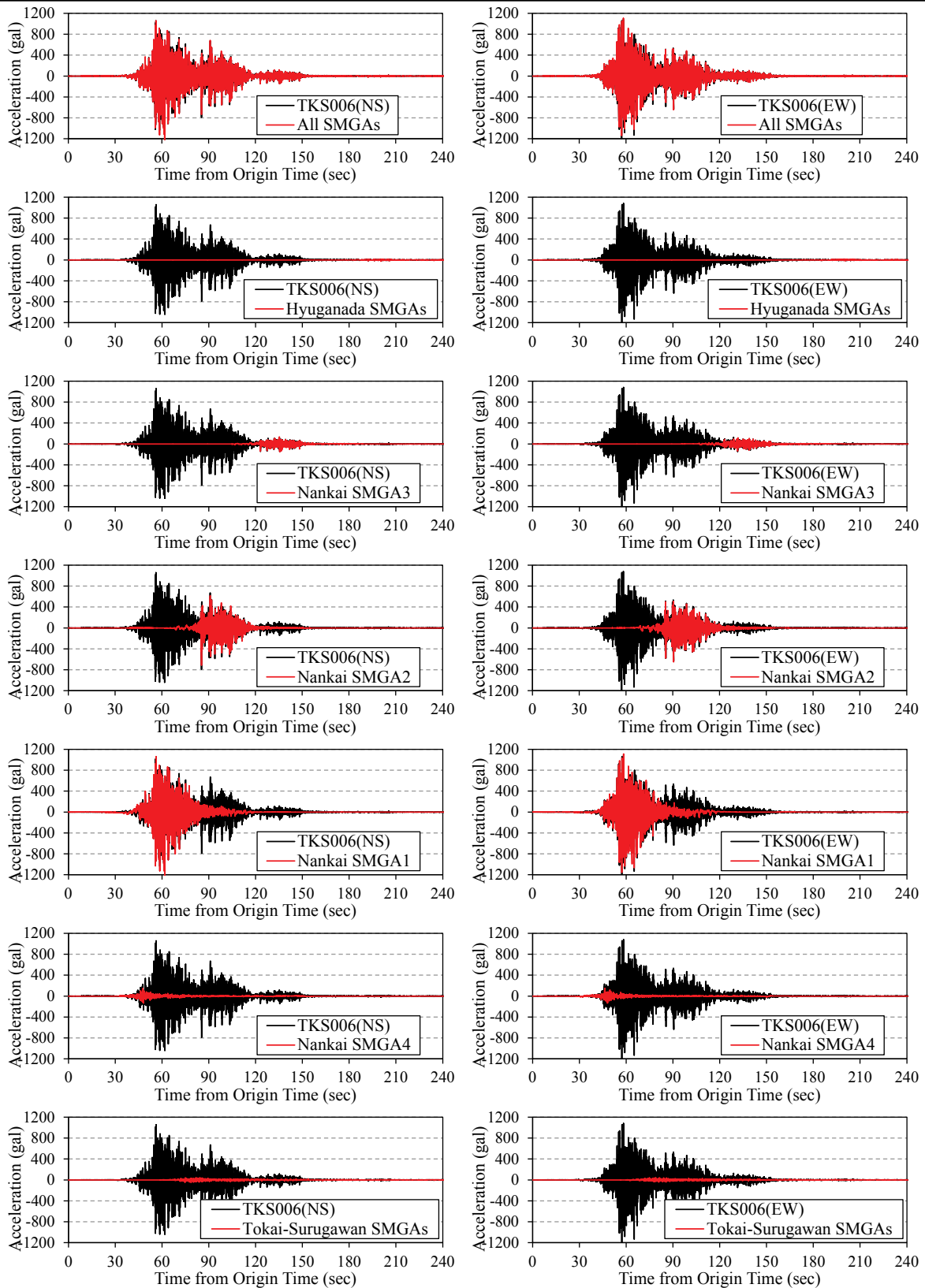


図 4-34: 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)による水平 2 成分の合成波形(K-NET 牟岐:TKS006).
 全ての SMGA と背景領域を含めた波形(黒)と個別の SMGA による寄与(赤).

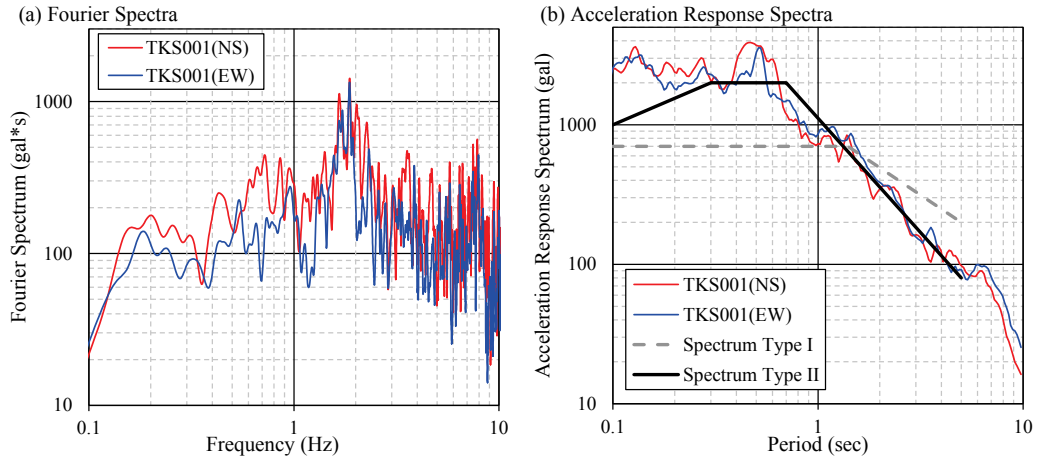


図 4-35: 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 鳴門: TKS001).

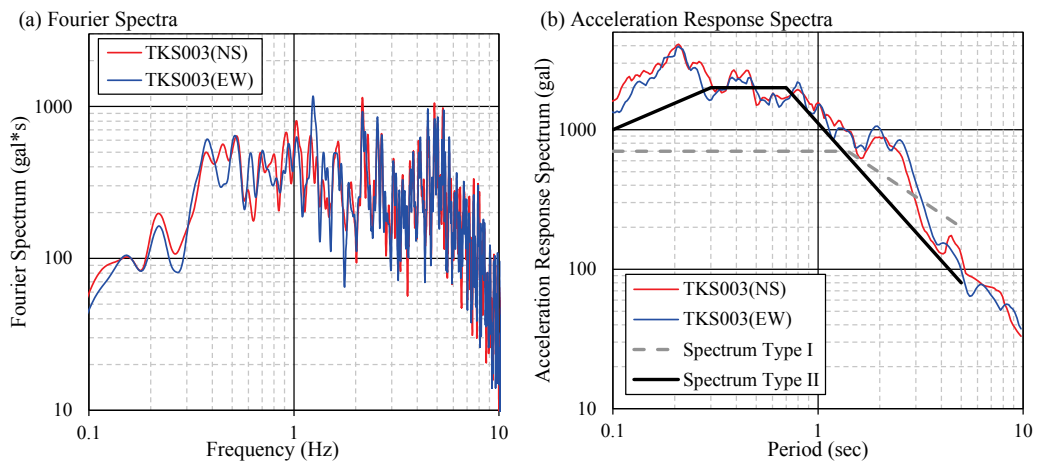


図 4-36: 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 阿南: TKS003).

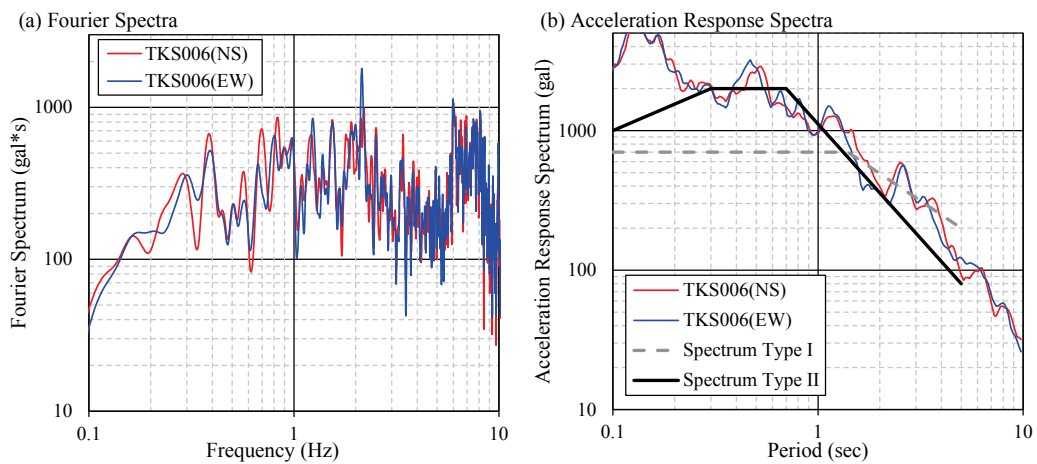


図 4-37: 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)による水平 2 成分の(a) フーリエスペクトルと(b) 加速度応答スペクトル(K-NET 牟岐: TKS006).

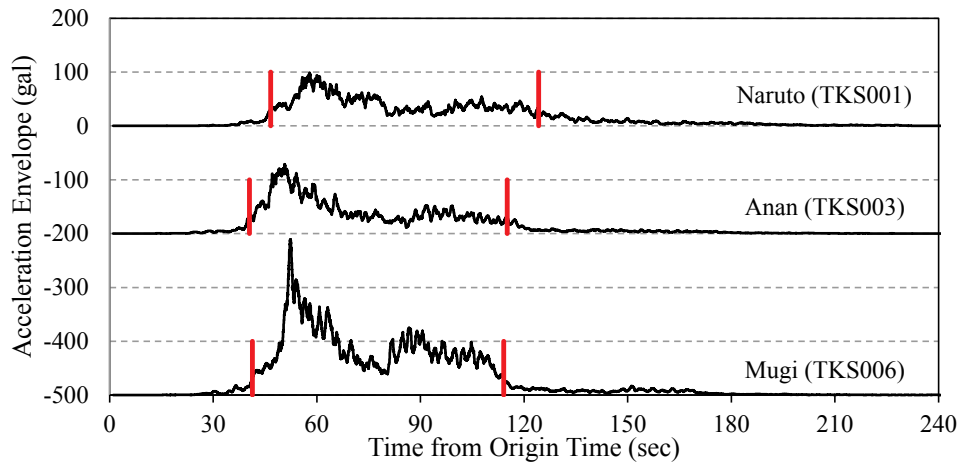
4.2.5 地震動継続時間

地震動の継続時間の定義は多く、Bolt(1973)¹⁶⁾による bracketed duration と Trifunac and Brady(1975)¹⁷⁾による地震動パワーに基づく継続時間が多用されている。Bracketed duration は地震記録の振幅が「あるレベル」を最初に超える時刻と最後に超える時刻の間の長さとして継続時間を定めるものである。「あるレベル」は任意に設定されるが、最大振幅の 10%とすることが多い。地震動パワーに基づく定義は、地震記録の全パワーの 90%を含む区間長 (5%から 95%までの区間) として継続時間を定めるものである。後者の定義は前者に比べて短く求まる傾向がある。ここでは、前者の考え方で「水平 2 成分のエンベロープが 30 gal を超える最初の時刻と最後の時刻の間の長さ」と定義することとした。「あるレベル」を固定値としたのは、最大振幅の何%という定義では波形により振幅が大きく異なるものの比較には適していないと考えたためである。また、工学的基盤における 30 gal は、地表までの増幅を考慮すると、地表において震度 4 程度の揺れの継続時間となり、体感や建造物の入力地震動の影響時間を考える上で適当であると考えたためである。エンベロープは、水平 2 成分の加速度値をベクトル合成した時の振幅を計算した後に 1 秒間 (100 サンプル) の移動平均を取って求めた。

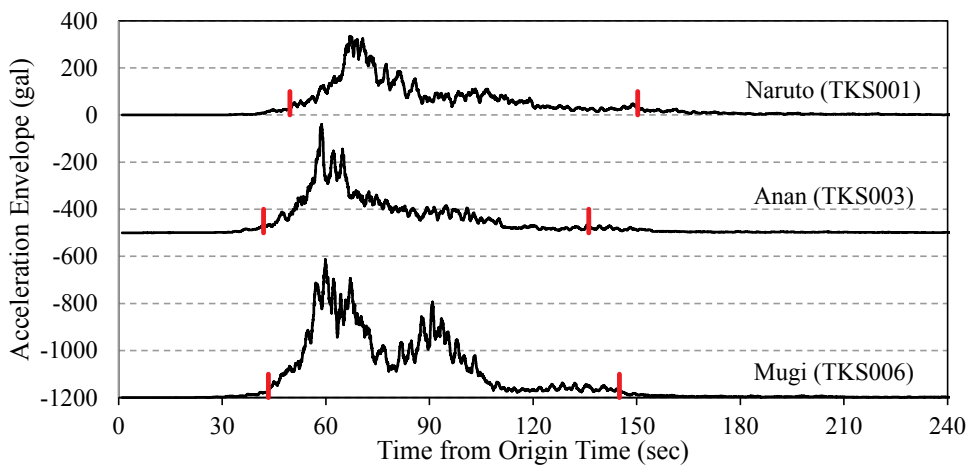
各断層モデルにおけるエンベロープ波形と地震動継続期間を図 4-38 に、地震動継続時間とエンベロープ最大値を表 4-7 に示す。中央防災会議モデル(2003)の継続時間は 70 ~ 80 秒程度であったが、巨大地震検討会モデル(2012)では 80 ~ 110 秒となっており、最長のケースでは 40 秒以上長くなっている。巨大地震検討会モデル(2012)では、基本ケース・東側ケース・陸側ケースにおいて 3 地点とも同程度の継続時間であったが、西側ケースでは K-NET 牟岐の継続時間が他 2 地点と比べて 30 秒以上長い。これは、南海域 SMGA3 までの距離が 2 地点では遠いために地震動が減衰し、継続時間に含まれなかったためである。陸側ケースでは 3 地点で揺れの大きさ・継続時間も大きく、西側ケースでは県の南部で揺れが大きく、継続時間が長いこととなる。

平成 23 年東北地方太平洋沖地震では、震源から 400 km 以上も離れた関東地方で広範囲に液状化被害が発生した。関東地方における地震動の振幅は地表で 200 gal 程度であり、液状化の原因は振幅のみではなく地震動の継続時間などの他の要因が大きいと指摘されている¹⁸⁾。また、建造物の上に乗った建造物に対しては、下の建造物の伝達関数というフィルタを通した波形が入力地震波となるため、共振が発生すると繰り返し回数による影響が大きく現れる¹⁹⁾。地震動の継続時間は、振幅やスペクトル特性に劣らない重要なパラメータであり²⁰⁾、建造物の被害推定や液状化の推定には中央防災会議モデル(2003)と比べて地震動の継続時間が長いことも考慮する必要がある。

(a) 中央防災会議モデル(2003)



(b) 巨大地震検討会モデル(2012) (基本ケース)



(c) 巨大地震検討会モデル(2012) (東側ケース)

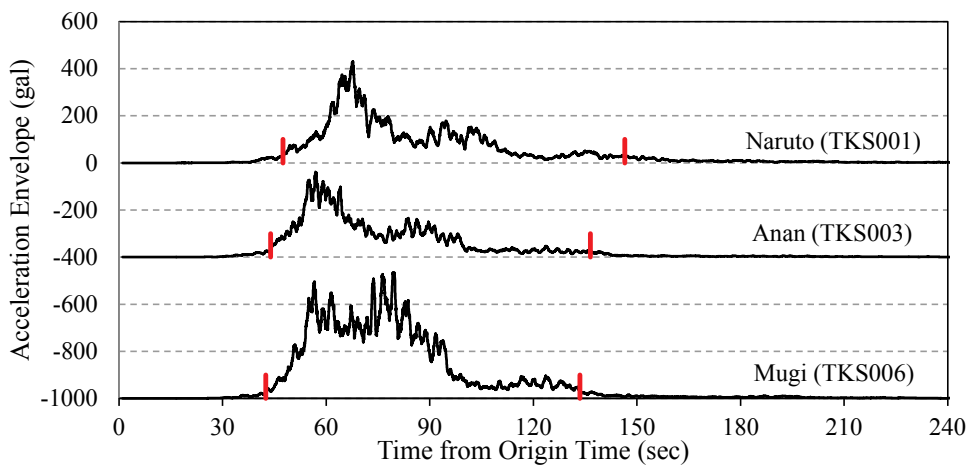
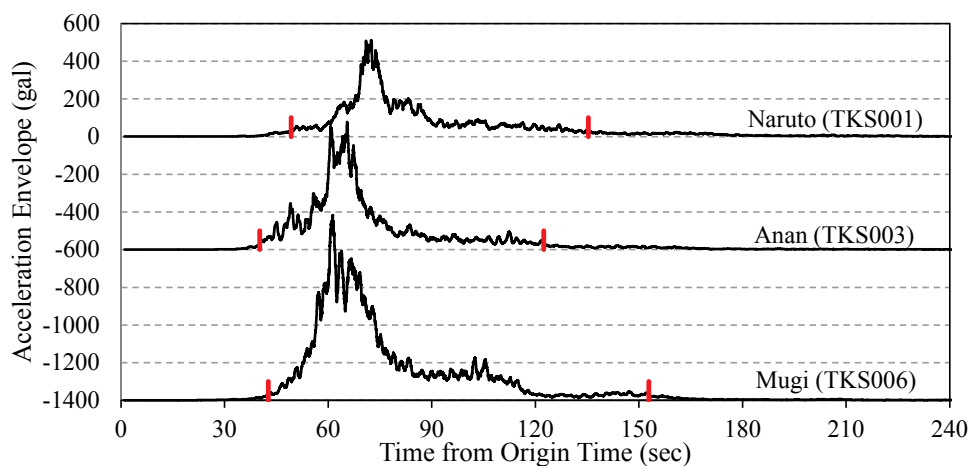


図 4-38: 各断層モデルで計算した K-NET 鳴門・阿南・牟岐における加速度エンベロープと地震動継続期間。赤線で示した時刻が 30 gal を超える最初と最後の時刻。(a) 中央防災会議モデル(2003), (b) 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース), (c) 巨大地震検討会モデル(2012)(東側ケース), (d) 巨大地震検討会モデル(2012)(西側ケース), (e) 巨大地震検討会モデル(2012)(陸側ケース)。

(d) 巨大地震検討会モデル(2012) (西側ケース)



(e) 巨大地震検討会モデル(2012) (陸側ケース)

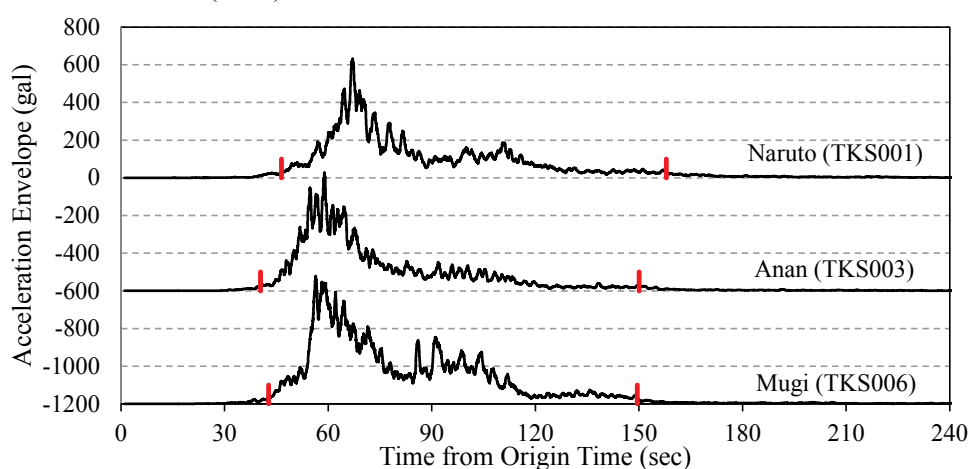


図 4-38: (つづき)

表 4-7: 中央防災会議モデル(2003)と巨大地震検討会モデル(2012)における地震動継続時間とエンベロープ最大値.

| 評価地点 | | 中央防災会議 モデル(2003) | 巨大地震検討会モデル(2012) | | | |
|----------------------|------|---------------------|------------------|---------|----------------|----------------|
| | | | 基本 | 東側 | 西側 | 陸側 |
| K-NET 鳴門 (TKS001) | 継続時間 | 78 sec | 101 sec | 99 sec | 86 sec | <u>111 sec</u> |
| | 最大値 | 98 gal | 334 gal | 431 gal | 511 gal | <u>631 gal</u> |
| K-NET 阿南 (TKS003) | 継続時間 | 75 sec | 94 sec | 93 sec | 82 sec | <u>110 sec</u> |
| | 最大値 | 128 gal | 460 gal | 361 gal | <u>677 gal</u> | 627 gal |
| K-NET 牟岐 (TKS006) | 継続時間 | 73 sec | 102 sec | 90 sec | <u>110 sec</u> | 107 sec |
| | 最大値 | 289 gal | 586 gal | 534 gal | <u>983 gal</u> | 679 gal |

4.3 緊急地震速報の発表シミュレーション

本節では、巨大地震検討会モデル(2012)の基本ケースにおいて地震発生直後に発表される緊急地震速報について検討を行う。地震発生後、どのタイミングでどのような震源情報が発表されるのかシミュレーションする。

4.3.1 シミュレーション手法

P波が断層破壊の情報を伝えるものとし、 j 番目の観測点では時刻 t において、それまでに届いたP波の元となった断層破壊エネルギーを知っているものと仮定する。その上で、観測点ごとに時刻 t における M_W を求め、その平均が緊急地震速報の M であるとする。実際の緊急地震速報のS波到達前の M 推定では、P波からS波到達までの最大振幅を用いる「P相マグニチュード」²¹⁾が用いられており、本シミュレーションではP相マグニチュードの時間経過に伴う成長を模擬することとなる。

断層全体は図4-2に示すとおり数多くの小断層($i=0, 1, \dots, N-1$ の N 個)に分割されている。断層全体の破壊開始時刻(地震発生時刻)を 0 とし、 i 番目の小断層の破壊開始時刻を t_i 、小断層の放出するモーメントを M_{0ei} 、ライズタイムを τ とする。 i 番目の小断層から出発したP波が j 番目の観測点へ届くまでにかかる時間(P波走時)を T_{ij} としたとき、時刻 t までに j 番目の観測点に届いている破壊エネルギーの大きさの情報 $M_{0ij}(t)$ は、

$$M_{0ij}(t) = \begin{cases} 0 & (t < t_i + T_{ij}) \\ \frac{t - (t_i + T_{ij})}{\tau} \times M_{0ei} & (t_i + T_{ij} \leq t < t_i + T_{ij} + \tau) \\ M_{0ei} & (t_i + T_{ij} + \tau \leq t) \end{cases} \quad \text{式 4-1}$$

で表すことができる。断層全体から j 番目の観測点に届いている破壊エネルギーの大きさの情報 $M_{0j}(t)$ は、

$$M_{0j}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} M_{0ij}(t) \quad \text{式 4-2}$$

で表される。時刻 t における j 番目の観測点で認識できる M は、モーメントマグニチュード M_W の定義²²⁾から、

$$M_{Wj}(t) = \frac{1}{1.5} (\log M_{0j}(t) - 9.1) \quad \text{式 4-3}$$

となる。P波が既に到達している観測点について $M_{Wj}(t)$ を計算し、その平均値が時刻 t における緊急地震速報の M となるというのが基本的な考え方である。ただし平均処理において、地震波が到達して間もない観測点では M が小さく見積もられるため、本計算では次の処理を追加した。

- (1) 2点処理の場合：平均値を M とするが、両者の差が0.5以上の場合には大きい方を M とする。
- (2) 3点以上の L 点処理の場合：平均値を M とするが、標準偏差が0.35を超える場合は平均値から最も外れたものを除いて、 $(L-1)$ 点処理を行う。

この処理は、実際の緊急地震速報処理において観測点数が少ない時の M 推定に用いられているものである²³⁾。ここで緊急地震速報の処理は、気象庁多機能型地震計の処理と防災科学技術研究所Hi-netの処理が別々に行われ、結果を統合して出力している。これは第1章で述べた歴史的経緯に

よる。そこで本計算でも両観測網で M を別々に計算し、大きい方の M を採用することとした。また、実際には地震波形の観測点からの伝送とセンターでの処理にかかる時間が必要なため、上記結果を一律 3 秒後ろへずらした。また緊急地震速報の M の飽和については、平成 23 年東北地方太平洋沖地震と同じ $M 8.1$ に到達した時点で最終報とした。震源位置と地震発生時刻は、モデルの値をそのまま用いることとし、震源決定計算の誤差はないものと仮定した。

4.3.2 シミュレーション結果

前項で説明した方法で求めた巨大地震検討会モデル(2012)の基本ケースにおける緊急地震速報の推定される発表内容を表 4-8 に示す。震央の位置は北緯 33.2 度、東経 135.9 度、震源の深さ 12 km (破壊開始点) 固定としている。破壊開始点から出た P 波は、破壊開始 8 秒後最寄りの観測点に到達し、11 秒後に緊急地震速報 (予報) 第 1 報が発表される。その後地震波を検知する観測点数が増加し、断層破壊が進むにつれて M が大きくなる。第 1 報発表から 5 秒後に緊急地震速報 (警報) が発表され、その 26 秒後の予報第 10 報で警報の更新報が発表される。予報第 3 報と第 10 報における警報対象地域 (震度 4 以上が予想される地域) と予報発表時点における主要動到達までの猶予時間を図 4-39 に示す。その後も M は大きくなり予報の更新報は発表されるが、警報の更新はない (警報の更新については次項で考察する)。3.3.1 で定義した M 成長時間は今回 59 秒であり、東北地方太平洋沖地震 59.7 秒とほぼ同じ結果となった。地震波検知時刻を基準とした M 成長推移を東北地方太平洋沖地震と重ね描きしたものを図 4-40 に示す。東北地方太平洋沖地震の実際の推移と類似している。

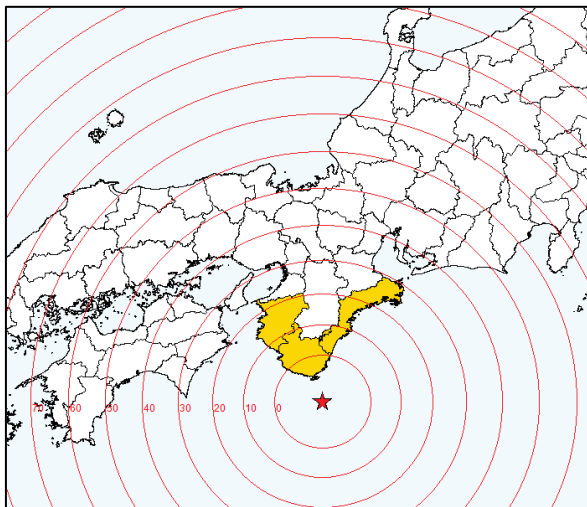
次に、この緊急地震速報 (予報・警報) を地震動評価した 3 地点で受信した場合に得られる予測情報について検討する。各地点における予想震度と猶予時間を表 4-9 に、K-NET 鳴門における受信画面を図 4-41 に示す。緊急地震速報 (予報) を報知等に使用する場合は、一般に「震度 4」がそのしきい値に選ばれることが多い。警報が和歌山県・三重県に発表される第 3 報では徳島県内の 3 地点いずれにおいても予想震度は震度 3 であり、しきい値に達していない。しきい値に達するのは第 5 報発表時である。この時点では主要動到達まで 20 秒以上の猶予時間がある。徳島県に警報が発表されるのは第 10 報のタイミングであるが、この時点ではいずれの地点においても主要動が到達して大きく揺れ始めていることになる。しきい値を震度 5 弱に設定した場合は、第 11 報で初めてしきい値に達することになり、この時点では既に揺れはピークに達している。

緊急地震速報の起動しきい値の決定は、通常震度階で 1 段階程度の誤差は持つものの緊急地震速報による予測震度がほぼ正しいものとして行われている。 $M 7$ 程度以下の地震に対してはこのような考え方で大きな問題は発生しないが、巨大地震時には破壊開始点から離れた場所では M の飽和によりしきい値に達せず起動しないか、起動したとしても既に大きく揺れているという可能性がある。前章で述べた「非常に大規模な地震が起きた」というトリガー情報としての活用方法については、この地震における徳島県では震源距離が小さいために、震度予測結果を使っても報知することができる。南海トラフの巨大地震モデル検討会による基本ケースの地表震度分布図³⁾上に震央から 600 km の範囲を記したものを図 4-42 に示す。震度 4 以上の揺れとなる範囲がほぼ含まれており、 $M 7.5$ 発表時にこの範囲に対して報知を行えば、この時点で震度 4 未満と予想されている警報対象地域以外に対しても主要動到達前に地震発生を知らせることができる (この時点での猶予時間は図 4-39 (b) の通り)。

表 4-8: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)で推定される緊急地震速報の発表推移.

| 報数 | 発表時刻 (秒) | M | 予測最大震度 | 備考 |
|----|----------|-----|--------|--------------|
| — | 8 | | | 最寄りの観測点にP波到達 |
| 1 | 11 | 5.7 | 震度4 | 1点処理 |
| 2 | 13 | 5.9 | 震度4 | |
| 3 | 16 | 6.3 | 震度5弱 | 警報発表 |
| 4 | 18 | 6.5 | 震度5弱 | |
| 5 | 19 | 7.3 | 震度6強 | |
| 6 | 24 | 7.0 | 震度6弱 | |
| 7 | 26 | 7.1 | 震度6弱 | |
| 8 | 34 | 7.2 | 震度6弱 | |
| 9 | 39 | 7.3 | 震度6強 | |
| 10 | 42 | 7.5 | 震度6強 | 警報更新 |
| 11 | 59 | 7.7 | 震度6強 | |
| 12 | 70 | 7.9 | 震度6強 | |
| 13 | 80 | 8.0 | 震度7 | |
| 14 | 86 | 8.1 | 震度7 | |

(a) 予報第3報



(b) 予報第10報

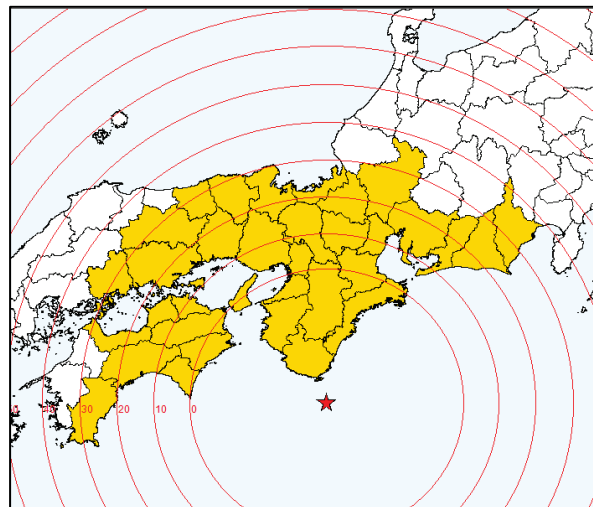


図 4-39: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)で推定した緊急地震速報の警報対象地域と警報発表時刻における主要動到達までの猶予時間. (a) 予報第3報(M6.3), (b) 予報第10報(M7.5).

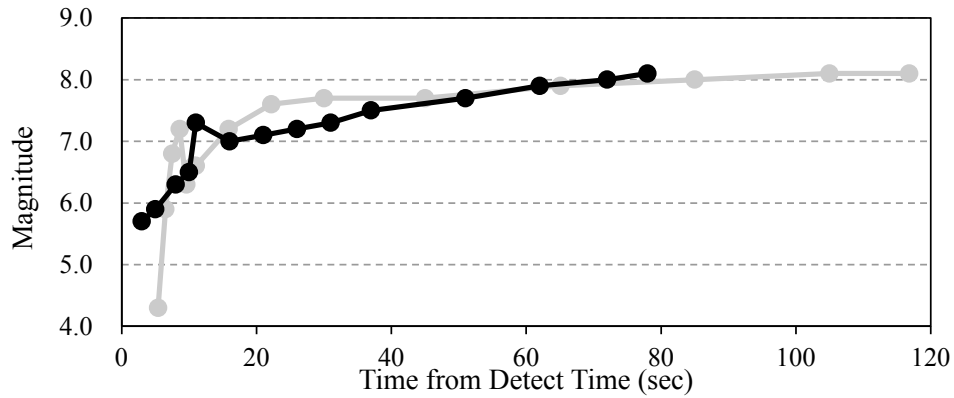
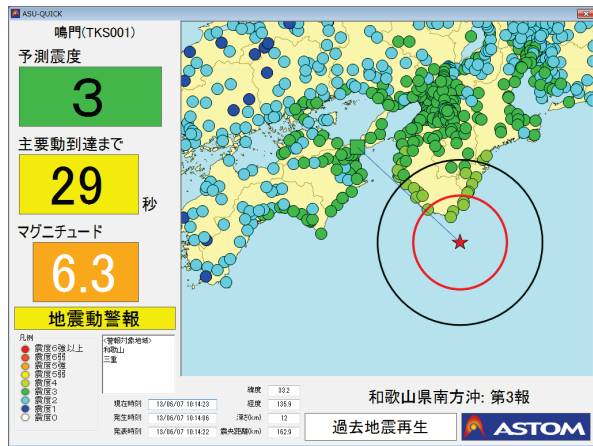
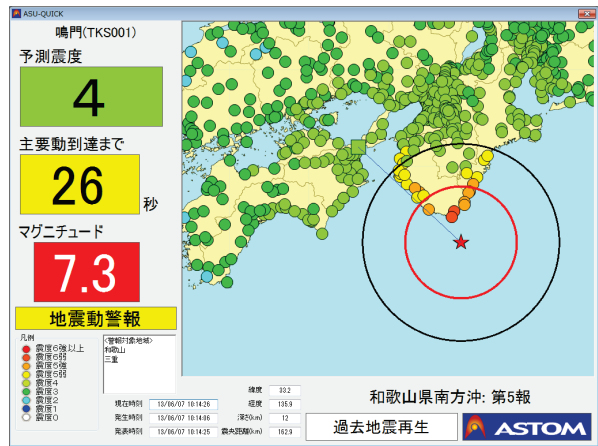


図 4-40: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)で推定した緊急地震速報(予報)のマグニチュード成長。横軸原点は観測点の地震波検知時刻。灰色は東北地方太平洋沖地震時のもの。

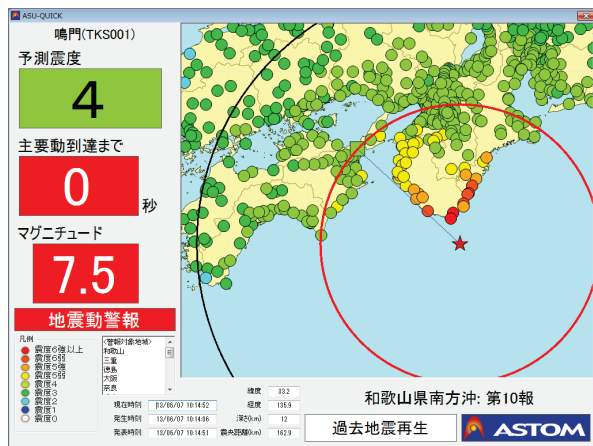
(a) 第3報警報発表時



(b) 第5報 震度4予想時



(c) 第10報警報更新時



(d) 第11報 震度5弱予想時



図 4-41: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)で推定した緊急地震速報(予報)を K-NET 鳴門で受信した場合のイメージ。(a) 第3報警報発表時, (b) 第5報 震度4予想時, (c) 第10報警報更新時, (d) 第11報 震度5弱予想時。

表 4-9: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)で発表される緊急地震速報(予報)を K-NET 鳴門・阿南・牟岐で受信した場合の予想震度と猶予時間.

| 報数 | 発表時刻 (秒) | K-NET 鳴門(TKS001) | | K-NET 阿南(TKS003) | | K-NET 牟岐(TKS006) | |
|----|-------------|------------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | | 震度 | 猶予時間 | 震度 | 猶予時間 | 震度 | 猶予時間 |
| 1 | 11 | 震度 2 | 34 秒 | 震度 2 | 29 秒 | 震度 2 | 30 秒 |
| 2 | 13 | 震度 3 | 32 秒 | 震度 3 | 27 秒 | 震度 3 | 28 秒 |
| 3 | 16 | 震度 3 | 29 秒 | 震度 3 | 24 秒 | 震度 3 | 25 秒 |
| 4 | 18 | 震度 3 | 27 秒 | 震度 3 | 22 秒 | 震度 3 | 23 秒 |
| 5 | 19 | 震度 4 | 26 秒 | 震度 4 | 21 秒 | 震度 4 | 22 秒 |
| 6 | 24 | 震度 4 | 21 秒 | 震度 4 | 16 秒 | 震度 4 | 17 秒 |
| 7 | 26 | 震度 4 | 16 秒 | 震度 4 | 11 秒 | 震度 4 | 12 秒 |
| 8 | 34 | 震度 4 | 11 秒 | 震度 4 | 6 秒 | 震度 4 | 7 秒 |
| 9 | 39 | 震度 4 | 6 秒 | 震度 4 | 1 秒 | 震度 4 | 2 秒 |
| 10 | 42 | 震度 4 | 0 秒 | 震度 4 | -5 秒 | 震度 4 | -4 秒 |
| 11 | 59 | 震度 5 弱 | -14 秒 | 震度 5 弱 | -19 秒 | 震度 5 弱 | -18 秒 |
| 12 | 70 | 震度 5 弱 | -25 秒 | 震度 5 弱 | -30 秒 | 震度 5 弱 | -29 秒 |
| 13 | 80 | 震度 5 強 | -35 秒 | 震度 5 弱 | -40 秒 | 震度 5 弱 | -39 秒 |
| 14 | 86 | 震度 5 強 | -41 秒 | 震度 5 弱 | -46 秒 | 震度 5 強 | -45 秒 |

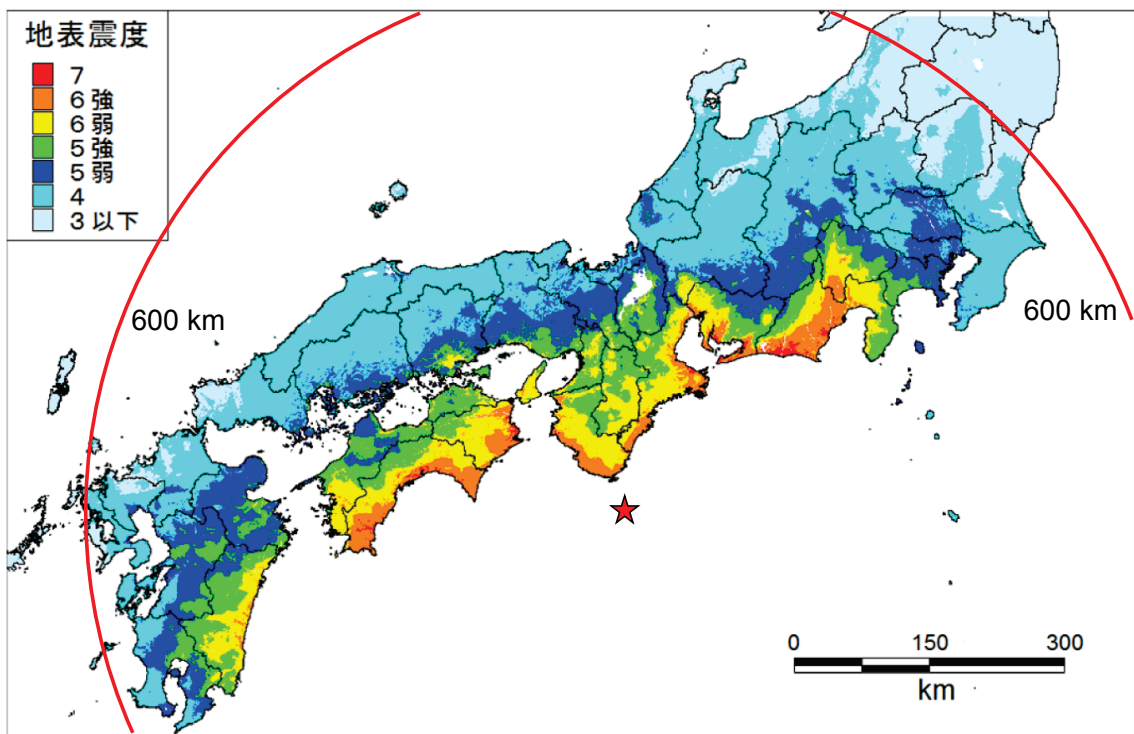


図 4-42: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)地表震度分布³⁾と震央から 600 km の範囲.

4.3.3 警報の更新

前項において、第 10 報の M 7.5 以降 M が大きくなっても警報が更新されないことを述べた。この原因は、第 11 報以降の予報では第 1 章に述べた警報更新の条件「震度 3 以下と推定されていた地域が震度 5 弱以上と推定された場合」を満たすものがないためである。第 10 報の警報を更新するためには、震源位置の変化はないものとする M 8.3 となる必要がある。つまり M 7 より大きい M で警報が発表されるとなかなか更新されないという現象が発生する。この位置で地震が発生したとき、一度警報が発表されると次に警報が更新されるために必要な M の大きさを警報発表時 M ごとに計算したものが表 4-10 である。緊急地震速報の M が飽和して例えば M 8.1 より大きくはならないとすると、 M 7.3 以上の警報はその後更新されることはない。予報を受信していれば更新報により大きな震度を伝えられる可能性があるが、携帯電話の一斉通知サービスなど警報を用いたものは、警報発表時の M が M 7.3 の時、高知県・愛媛県・宮崎県・静岡県の一部では震度 6 弱以上の揺れとなるにも関わらず情報が伝達されないことになる。徳島県内については警報発表されないことはなさそうであるが、破壊開始点から離れた地域では、実際の揺れが大きいにも関わらず警報が発表されないことが起こりうる。

表 4-10: 巨大地震検討会モデル(2012)(基本ケース)で発表される緊急地震速報(警報)でさらに更新報の警報が発表されるのに必要な M の大きさ。

| 警報発表時 M | 警報更新に必要な M |
|-----------|--------------|
| 6.3 – 6.4 | 7.4 |
| 6.5 – 6.6 | 7.5 |
| 6.7 | 7.6 |
| 6.8 – 6.9 | 7.8 |
| 7.0 | 7.9 |
| 7.1 | 8.0 |
| 7.2 | 8.1 |
| 7.3 – 7.4 | 8.2 |
| 7.5 | 8.3 |
| 7.6 | 8.4 |
| 7.7 | 8.5 |

4.4 情報の活用

4.2 では各ケースにおける地震動を策定し、4.3 では巨大地震検討会モデル(2012)基本ケースにおける緊急地震速報の発表シミュレーションを行った。一方で、徳島県ではこの地震における津波影響開始時間と最大到達時間²⁴⁾をとりまとめている。地震発生後の地震動と津波到達、それらに対応するための緊急地震速報・津波情報などの防災情報を同じ時間軸上に重ねたものを図 4-43 に示す。津波警報のタイミングについては、気象庁の東海・東南海・南海の 3 連動地震に対する津波警報発表イメージ²⁵⁾から、地震発生後約 3 分で発表されるとした。

まず、緊急地震速報と地震動については、震源地に比較的近い徳島県であっても、しきい値は「震度4」以下にしておかないと報知が主要動に間に合わない可能性がある。破壊開始点が想定より東だった場合には、破壊開始点から遠ざかるため、さらにその可能性は高くなる。しきい値を「震度5弱」にした場合に報知するタイミングでは、3地点とも地震動の大きさは100 galを超えており、避難行動に結びつけることはできない。緊急地震速報（警報）については、徳島県が地震動警報の対象となるタイミングでは、沿岸部ではすでに主要動が到達している可能性があり、警報を見聞きしてから何らかの行動を起こすという計画では遅すぎる可能性がある。緊急地震速報（予報）を受けられる環境にあれば、揺れる前に情報を得て安全確保の行動に移すことが可能であるが、そうでなければ大きな揺れを感じる方が先になる可能性が高い。

次に津波避難について、30 gal以上の大きさの揺れ（工学的基盤における）は2分近く継続し、揺れが収まる頃に津波警報が発表される。合成した地震動は、サイト表層の増幅を考慮していないこと、長周期地震動については考慮していないため、実際に地表にいる人にとってはさらに長く地震動が継続することが考えられる。防災無線による報知などを聞いて、この時点から避難行動を開始すると、徳島県南部の牟岐では避難開始から10分未満で津波の影響が出始める。それより北に位置する阿南や鳴門でも15分程度で津波の影響が出始める。津波影響開始時点で十分な安全な場所への避難が完了することは困難であるが、県南部だけでなく北部においても揺れが収まったらすぐに避難行動に移すことが必要ということになる。

(a) K-NET 鳴門（津波想定は鳴門市里浦海岸）

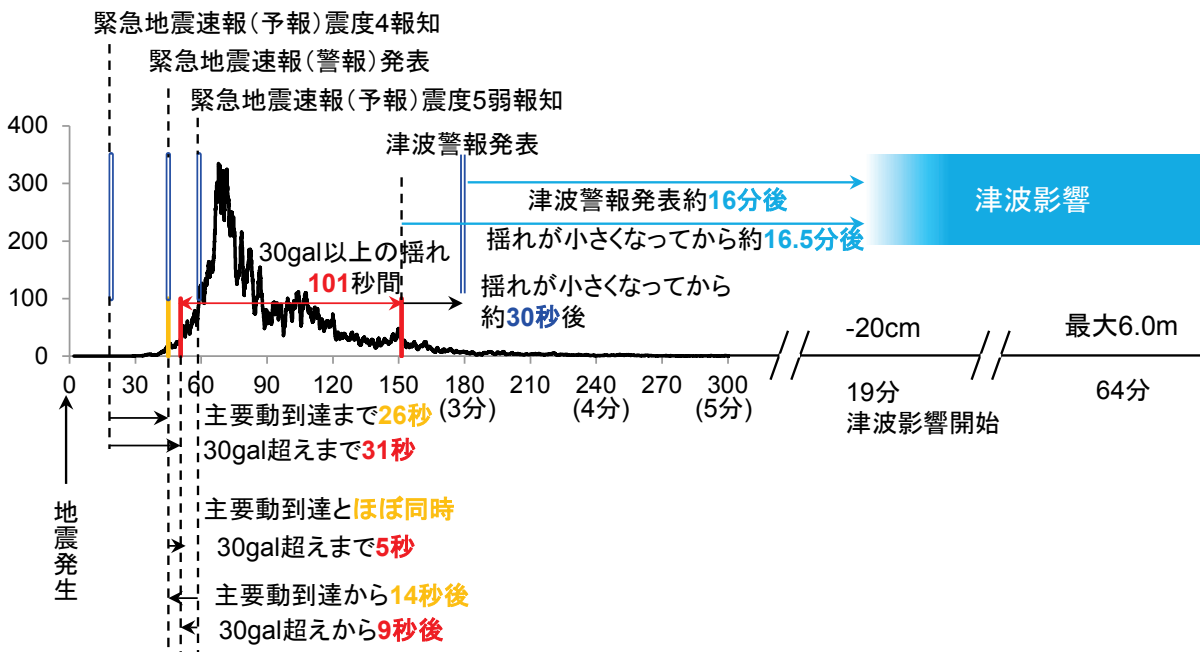
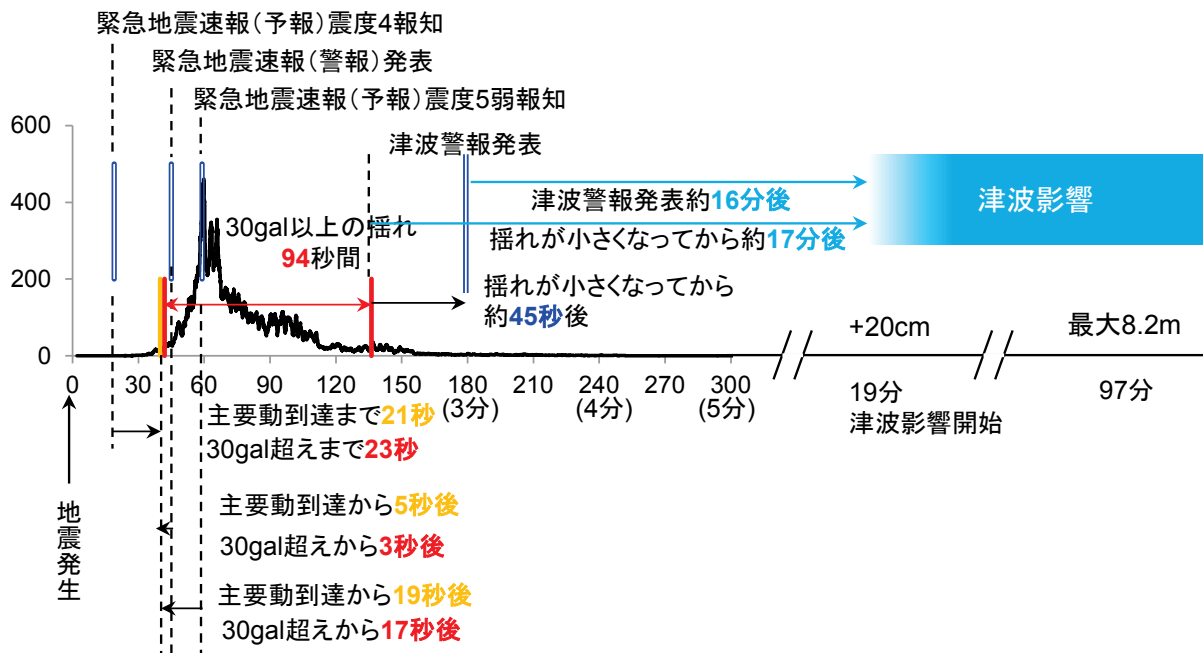


図 4-43: 地震発生後の地震動と津波到達, それらに対応するための緊急地震速報・津波情報の受信タイミング. (a) K-NET 鳴門, (b) K-NET 阿南, (c) K-NET 牟岐.

(b) K-NET 阿南 (津波想定は阿南市福井川河口)



(c) K-NET 牟岐 (津波想定は牟岐町牟岐漁港湾口)

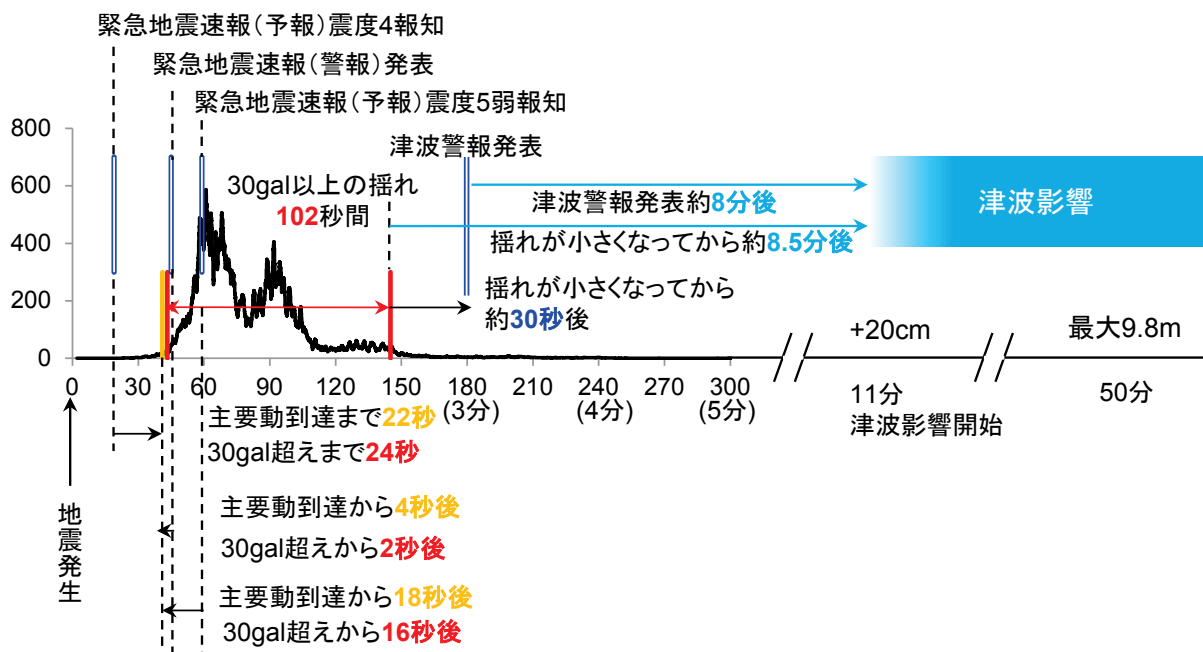


図 4-43: (続き)

4.5 まとめ

本章では、南海トラフで発生する海溝型地震の断層モデルとして、中央防災会議モデル(2003)と巨大地震検討会モデル(2012)について、徳島県内の3地点(鳴門・阿南・牟岐)における加速度地震動波形を、統計的グリーン関数法を用いて作成した。波形合成では、第2章と同様震源域が広範囲に及ぶことから、位相特性を決める中小地震波形を領域により使い分けた。合成された地震動波形の比較では、巨大地震検討会モデル(2012)のいずれのケースも中央防災会議モデル(2003)より陸域に近いところに SMGA が設定されたため、はるかに大きな地震動となった。巨大地震検討会モデル(2012)では、南海域 SMGA1 と SMGA2 で強震動の大部分を構成しており、 M_w 9.0 の日向灘域から駿河湾域まで連動したパターンではなく、 M_w 8.7 の南海域単独発生の場合でもほぼ同程度の地震動となることが分かった。道路橋示方書のタイプ I・II 応答スペクトルとの比較では、中央防災会議モデル(2003)では両タイプのスペクトルを超えない程度であったが、巨大地震検討会モデル(2012)ではタイプ I を大きく超え、ケースによってはタイプ II も超える大きさであった。3地点の比較では、牟岐>阿南>鳴門と震源域に近い順に地震動が大きくなった。地震動継続時間については2分近く 30 gal を超える地震動が継続し、非常に長い地震動となった。

次に巨大地震検討会モデル(2012)の基本ケースについて、緊急地震速報(予報・警報)の発表シミュレーションを行った。時間経過における M 成長は、平成23年東北地方太平洋沖地震時に発表された緊急地震速報と類似の結果となった。また、地震動警報更新の条件「震度3以下と推定されていた地域が震度5弱以上と推定された場合」について考えると、 M 7.3以上で警報が発表されるとそれ以上の更新は行われない可能性が高いことを示した。

統計的グリーン関数法で合成した地震動波形と緊急地震速報発表シミュレーションの結果を重ね合わせ、さらに津波の想定を重ねると、情報活用における課題をいくつか見いだすことができた。地震動については、評価地点の3地点では、震度4を緊急地震速報(予報)における起動しきい値と設定しておくことで20秒以上の猶予時間があり、避難行動に役立てることができるが、震度5弱と設定すると起動した時点では100 gal を超える大きな揺れとなっており、避難行動に結びつけることができないことが分かった。また、緊急地震速報(警報)については、徳島県が地震動警報の対象となるタイミングでは、沿岸部ではすでに主要動が到達しており、警報を見聞きしてから何らかの行動を起こすことは困難である可能性がある。次に津波避難については、30 gal を超える地震動が2分程度継続し、揺れが収まる頃には津波警報が発表される。牟岐では避難開始から10分未満、阿南や鳴門でも15分程度で津波の影響が出始めるため、県北部でも津波避難のための時間的余裕はほとんどないことが分かった。

構造物の地震への事前対策として耐震解析が行われ、その結果は地震時の被害を小さく抑えたり容易に復旧させることができるように設計にフィードバックされる。これと同じように、緊急地震速報システムのような直後対応システムを有効に動作させるための事前対策として、断層モデルから発表される情報をシミュレーションすると、地震発生時具体的にどのような情報をどのようなタイミングで受けることができるか検証することが可能となる。この結果をシステムへフィードバックすることによって、そのシステムの信頼性を向上させることが期待できる。

参考文献

- 1) 中央防災会議 東南海, 南海地震等に関する専門調査会: 東南海, 南海地震に関する報告, 2003年12月.
- 2) 文部科学省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, 2009年7月21日.
- 3) 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について(第一次報告), 2012年3月31日.
- 4) 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会: 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告) 強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—, 2012年8月29日.
- 5) Kurahashi, S. and Irikura, K.: Source model for generation strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63** (7), 571–576, 2011.
- 6) 野津厚, 長尾毅: スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, *港湾空港技術研究所資料*, 1112, 2005.
- 7) 独立行政法人防災科学技術研究所: 強震観測網 K-NET, <http://kyoshin.bosai.go.jp/>, 2013年5月31日閲覧.
- 8) 国土交通省, 独立行政法人土木研究所, 独立行政法人港湾空港技術研究所: 国土地盤情報検索サイト KuniJiban, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/>, 2013年5月31日閲覧.
- 9) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 299 pp., 1994.
- 10) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, *日本建築学会構造系論文集*, **514**, 97–104, 1998.
- 11) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society A*, **241**, 1226, 376–396, 1957.
- 12) 川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, *日本地震工学会論文集*, **4** (1), 33–52, 2004.
- 13) 内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会: 第14回議事概要について, 2012年4月27日.
- 14) 野津厚, 菅野高弘: 経験的サイト増幅特性・位相特性を考慮した強震動評価手法—因果性と多重非線形効果に着目した改良—, *港湾空港技術研究所資料*, 1173, 2008.
- 15) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V. 耐震設計編), 318 pp., 2012.
- 16) Bolt, B. A.: Duration of strong ground motion, *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering*, 1304–1313, 1973.
- 17) Trifunac, M. D. and Brady, A. G.: A study on the duration of strong earthquake ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **68** (5), 1487–1520, 1978.
- 18) Ishihara, K.: Liquefaction in Tokyo bay and Kanto regions in the 2011 Great East Japan Earthquake, *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, 63–81, 2012.
- 19) 加藤尚, 室野剛隆: 長継続時間地震動が電車線柱～構造物の地震応答に与える影響, *強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム*, 31–34, 2012.
- 20) 神山眞: 3.11 巨大地震—Duration 再考—, *強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム*, 3–14, 2012.
- 21) 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,

http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats_EEW/reference.pdf, 2008年7月29日.

- 22) Kanamori, H.: The energy release in great earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **82** (20), 2981 – 2987, 1977.
- 23) 大竹和生：よくわかる緊急地震速報，第2回データ科学ワークショップ（科学情報学研究会），http://www.gfd-dennou.org/arch/davis/workshop/2009-08-20/presen/20090821C_Ohtake.pdf, 2009.
- 24) 徳島県：徳島県津波浸水想定の公表について，<http://anshin.pref.tokushima.jp/docs/2012121000010/>, 2012年10月31日.
- 25) 気象庁：東北地方太平洋沖地震による津波被害を踏まえた津波警報の改善，http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tsunami_keihou_kaizen/20tsunami_keihou_kaizen_all.pdf, 2012年3月.
- 26) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Transactions American Geophysical Union*, **79**, 579, 1998.

第5章 結論

Chapter 5: Conclusions

本研究では、2011年3月11日に発生した平成23年東北地方太平洋沖地震における重要構造物地点の地震動の再現を行った。また、この地震とその後の余震で明らかとなった緊急地震速報の「限界」を解析し、防災・減災のための情報利活用に向けて対応策を含めた検証を実施した。マグニチュード9クラスの地震発生は国内初であり、この地震で得た知見は今後数十年以内に発生すると考えられる南海トラフにおける海溝型地震への対策に活かされるべきである。

第2章では、東北地方太平洋沖地震においてダムサイトで得られた地震動波形を、経験的グリーン関数法を用いて再現した。その際、断層域が広範囲に及ぶことを考慮して、従来は単一の小地震記録をグリーン関数と用いていたのに対し、強震動生成域ごとに異なるグリーン関数を使用した。地震動の再現計算から、このサイトでは宮城沖と福島沖の強震動生成域からの地震動が同時刻に到達することにより加速度最大値とその時刻を決めたことが分かった。強震動生成域とサイトの地理的關係・破壊伝播の方向により複数の強震動生成域の影響が重なり合うことがある。このことにより、サイトによって最大加速度や地震動継続時間に大きな差が出る可能性があるため、構造物の耐震検討を実施する際にはこの効果を配慮して入力地震動策定を実施する必要がある。

第3章では、東北地方太平洋沖地震で明らかとなった緊急地震速報の「限界」について検証した。大規模な地震の推定精度の限界については、マグニチュードの即時評価に限界があることにより予想震度が過小評価される問題に対して、大地震発生と判断した時には経験式による震度予測ではなく震源から一定範囲内のエリアには報知を行うという、地震動予報許可事業者がすぐに実施できる対策を示した。また、複数の地震が時間的・空間的に近接して発生した際の誤報について、誤報の発生確率を定量化することで、運用形態の変更の意思決定を補助する手法を提案した。

第4章では、2012年に設定された南海トラフの巨大地震強震断層モデルの断層パラメータを使い、第2章で行ったように強震動生成域ごとに異なるグリーン関数を用いて、徳島県内3地点における地震動波形の合成を行った。またこの地震が発生した場合、緊急地震速報がどのように発表されるのかシミュレーションを行い、地震発生後の地震動と津波、それらに対応するための緊急地震

速報や津波情報などの防災情報を同じ時間軸上に重ね合わせた。こうすることにより、第3章での検討事項も含めて地震発生時に何が起きるか具体的に想像することが可能となり、地震直後対策を検討する上での課題抽出に役立てることが可能となる。

想定される巨大地震に対しては、地震発生時に現在ある緊急地震速報・津波情報のほか、強震モニタのような今後本運用になると期待されるリアルタイムの揺れの情報など、様々な情報を有効に活用して防災・減災に役立てたい。情報伝達の手段も多様化しており、スマートフォンなどへ瞬時に広く情報を伝えることも現実のものとなっているため、今後は様々な防災情報が地震発生時に伝えることができる世の中になる。想定地震に対して科学的根拠を持った断層モデルが提案され、構造物の耐震設計等には使用されている。耐震設計は、地震への事前対策として、あらかじめ想定する地震動に対して構造物がどの程度被害を受けるか計算することで、地震時の被害を小さく抑えたり容易に復旧させることができるよう行われる。これと同様のことを緊急地震速報のような地震時に得られる情報に対しても適用し、断層モデルから発表される緊急地震速報をシミュレーションすることで、地震発生時具体的にどのような情報をどのタイミングで受けられるかを検証することができる。地震動と地震動に関する防災情報、津波と津波に関する防災情報を同じ時間軸で並べると、既存の直後対応システムの不足する部分を発見することができる。これらは、災害と入手可能と想定される情報を並べて具体的に想像できるようにすることで初めて可能となることである。この結果を直後対応システムの設計へフィードバックさせることで、将来の巨大地震に対する備えを一段高いものにすることができると考える。

謝辞

本論文は、筆者が徳島大学大学院先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻の博士後期課程で行った研究成果をとりまとめたものです。この間、多くの方々のご指導、ご協力をいただきましたことへ感謝申し上げます。

徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 大角恒雄教授（現 独立行政法人防災科学技術研究所社会防災システム研究領域）と同研究部 成行義文教授には、指導教員として終始懇切なご指導とご助言をいただきました。同研究部 長尾文明教授と同研究部 渦岡良介教授には、ご多忙にも関わらず本論文の審査を引き受けてくださり、貴重なご指摘・ご助言をいただきました。同研究部 近藤光男教授と同研究部 上月康則教授には、講義のレポート等を通じて本テーマにおける課題整理となるご助言をいただきました。本課程での研究活動にあたり、勤務先である株式会社先端力学シミュレーション研究所と一般財団法人砂防・地すべり技術センター関係各位には暖かいご声援とご協力をいただきました。

独立行政法人港湾空港技術研究所地震防災研究領域地震動研究チーム 野津厚チームリーダーには、強震動波形合成手法に関してご指導いただきました。独立行政法人防災科学技術研究所 青井真地震観測データセンター長と同研究所社会防災システム研究領域 中村洋光主任研究員には、リアルタイムの強震動観測値の活用方法についてご指導・ご助言をいただきました。株式会社先端力学シミュレーション研究所防災事業推進室メンバーには、業務を通じて緊急地震速報に関するデータ解析等のご支援をいただきました。

第2章のダム基礎での地震動再現においては、電源開発株式会社柏柳正之調査役にはダムで得られた記録の提供とデータの利用に関する多くの助言を頂きました。

第3章の緊急地震速報を用いた道路安全即時評価システムの開発にあたっては、西日本高速道路株式会社四国支社大内浩之所長には高速道路建設時のボーリングデータの提供とデータの利用に関する多くの助言を頂きました。平成23年東北地方太平洋沖地震における推計震度分布図(図3-5(c))は、気象庁地震火山部から提供いただきました。

本研究では、気象庁一元化处理震源リストの震源情報、独立行政法人防災科学技術研究所の広帯域地震観測網 F-net による CMT 解、強震観測網 K-NET・KiK-net の強震記録、地震ハザードステーション J-SHIS の表層地盤情報を使用させて頂きました。国土交通省・独立行政法人土木研究所・独立行政法人港湾空港技術研究所の国土地盤情報検索サイト KuniJiban のボーリングデータを使用させて頂きました。道路安全即時評価システムの表示部には、国土地理院の電子国土 Web システムを利用させて頂きました。図の作成には、Wessel and Smith(1998)の GMT を使用させて頂きました。緊急地震速報の受信画面には、株式会社先端力学シミュレーション研究所の ASU-QUICK を使用いたしました。

最後に、私が地震防災を志すきっかけを与え、地震電磁気現象という学際領域で厳しく鍛えてくださった大阪大学 故池谷元何名誉教授に感謝申し上げます。