

学位申請論文

長周期長時間地震動記録に基づく設計用入力地震
動の応答スペクトルとエネルギースペクトルの関
係に関する研究

Study on Relationships between Response Spectra and Energy Spectra for Design
Earthquake Ground Motions based on Long-period and Long-duration Ground Motion
Records

平成 30 年 3 月

小穴 温子

要旨

周期数秒以上の長周期成分を有する地震波が大規模平野などの堆積層が厚く発達した場所に達すると、長周期成分の揺れの増大と数分間にも及ぶ継続時間の伸長を伴う、いわゆる長周期長時間地震動が生じる。2003 年十勝沖地震の際に、長周期かつ長時間の揺れにより、石油タンクのスロッシングが発生し、大きな被害をもたらした。この地震以来、超高層建物等の設計用入力地震動として長周期地震動を検討することの必要性が広く認識されるようになった。そして、2011 年東北地方太平洋沖地震の際にも、震源から遠く離れた堆積盆地上の首都圏の超高層建物において、長周期かつ長時間の地震動により 10 分以上も大きな揺れが続き、これを契機に長周期長時間地震動という言葉が広く用いられるようになった。また、このような地震動が構造物の応答に与える影響とその評価方法が課題として再認識された。近い将来にその発生が懸念されている南海トラフ沿いの地震や相模トラフ沿いの地震においても、長周期長時間地震動により長周期構造物が共振し大きく揺れるとともに、長時間にわたる繰り返しの揺れにより建物の損傷が進行することが懸念される。

応答低減係数または減衰関数は、最大応答予測に有用であり、簡便で効率的に耐震性能を評価できる指標として従来から用いられている。また、長周期地震動の評価指標である単位地震動の繰り返し数 f 値は減衰関数を用いて表され、ここでの減衰関数はエネルギースペクトルと速度応答スペクトルの比率として定義されている。減衰関数は構造物に入力されるエネルギーの推定にも有用である。しかし、従来の応答低減係数または減衰関数は、その導出において対象とした地震動の継続時間が短く、短周期帯の評価に重きが置かれていたため、継続時間と周期帯の適用範囲が限られるという課題を有している。

長周期地震動または長周期長時間地震動の観点から、設計用入力地震動について考える。告示波に代表される設計用模擬地震動の時刻歴波形を作成する際には、その振幅特性と位相特性の両方を適切に設定する必要がある。しかしながら、現行の告示では、振幅特性の応答スペクトルのみが規定され、位相特性と経時特性については 60 秒以上の継続時間が必要ということ以外に規定はなく、位相の選択基準も明示されていない。そのため、実務においては、告示スペクトルに組み合わせる位相として、従来から用いられているいわゆる標準波（El Centro 記録、Taft 記録、八戸記録）の観測位相あるいはランダム位相が標準的な選択肢となっており、地震動の継続時間が短く設定される場合が多い。一方で、近年、長周期地震動の振幅特性と位相特性に関する研究が行われるようになってきた。既往の研究では、振幅特性として加速度応答スペクトルまたはエネルギースペクトル、位相特性として位相スペクトルを指標に観測記録を分析し、それぞれの経験式を求め、長周期地震動波形を予測する方法が提案されている。これまでに、地震動の入力エネルギーについて定量的に評価された例はこの研究のみである。しかし、この経験式に基づき作成された波形の応答スペクトルとエネルギースペクトルの両者の対応関係に関して、観測記録を用いた検

証はなされていない。

以上のように、長周期長時間地震動をはじめとする継続時間の長い地震動に対する長周期構造物の耐震性能検証のためには、建物応答評価と設計用入力地震動評価の双方において、最大応答値と入力エネルギーの両方の観点が必要であるが、両方を兼ね備えた評価方法の開発は発展途上と言える。設計実務では、最大応答値に加えて累積応答値についても検討する事例が増えているため、それに対応して、地震動においても応答スペクトルに加えてエネルギースペクトルの評価も必要と考えられる。

本論文は、長周期長時間地震動を含めた継続時間の長い地震動の実記録に基づき減衰関数を定量的に評価し、設計用入力地震動の目標応答スペクトルから目標エネルギースペクトルを評価する方法を示したものである。近年、地震観測が広域かつ稠密に行われるようになり、地震計の精度も高まってきたことで、継続時間の長い地震動記録が数多く得られるようになった。このような状況の変化を踏まえ、本論文では国内の主要な被害地震を中心に、継続時間が長い観測記録を多く収集し、従来の減衰関数の適用範囲を長周期側へ拡張した。また、減衰関数を用いれば、目標応答スペクトルまたは目標エネルギースペクトルのどちらか一方が決まれば他方を設定することができることに着目し、応答スペクトルからエネルギースペクトルを設定する方法を示した。

本論文は、全5章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、既往の研究を整理し、本論文の構成を示した。

第2章では、単位地震動の繰り返し数 f 値に着目し、 f 値と地震動の震源・伝播・サイト特性との対応について分析した。2011年東北地方太平洋沖地震、2003年十勝沖地震本震および最大余震の観測記録を用いて、周期帯毎に f 値とその構成要素である平均擬似速度応答スペクトルおよび平均エネルギースペクトルの地理的な分布を示し、マグニチュード・震源距離・サイト増幅特性との対応関係を概略的に捉えた。そして、周期1秒以下の f 値は、マグニチュードと相関があることを示した。周期2秒以下の f 値は、震源距離と相関があることに加えて、震源断層と観測点との幾何学的な位置関係に起因する方位依存性があることを示した。周期2秒以上の f 値は、平野部や堆積盆地構造が厚く発達している地域で相対的に大きくなる傾向があり、特にそのような構造の水平方向の広がりが増加している可能性を指摘した。

第3章では、応答スペクトルとエネルギースペクトルの比率を表す減衰関数と実効継続時間に着目し、両者の関係を定量的に整理した。減衰関数は f 値の定義式に含まれ、 f 値の大きさを決定づける指標である。はじめに、既往研究の減衰関数や応答低減係数について整理するとともに、周期帯毎の実効継続時間の違いが減衰関数に及ぼす影響について、固有周期と減衰関数の関係から確認した。ついで、エネルギースペクトルに漸近性が認められなかった地震動を対象に、実効継続時間をパラメータとして、減衰関数の平均的な経験式とその変動幅を周期帯毎（0.5～1秒、1～2秒、2～6秒）に導出した。また、導出した経験式（以後、提案式とよぶ）と既往式との対応について考察した。さらに、提案式を用い

て、長周期長時間地震動の 5%減衰の観測擬似速度応答スペクトルから 10%減衰のエネルギースペクトルを推定し、特に後続動が増幅するような冗長的な長周期長時間地震動に対して、既往の推定式よりも提案式のほうが長周期帯の推定精度が向上することを示し、提案式の有効性を確認した。最後に、提案式の適用範囲を考察した。漸近比を定義し、その値と提案式の適用性の関係を調べた結果、80%程度のエネルギースペクトルの推定精度を目標とすると、概ね漸近比 0.5 以下が提案式を適用できる地震動の基準となることを示した。提案式の適用範囲外となる地震動は、内陸地殻内地震やプレート境界地震よりもスラブ内地震に相対的に多く、そのうち概ね震度 4 以上の地点であることがわかった。なお、提案式作成時の検討対象外ではあるものの、周期 1~2 秒程度が卓越した代表的なパルス性地震動に対しても、70%前後の精度でエネルギースペクトルを推定可能であることを明らかにし、多様な地震動に対して実用的に幅広く活用できる式であることを示した。

第 4 章では、第 3 章で導出した減衰関数の提案式を用いて、建築基準法の告示スペクトル（レベル 2）に基づく設計用目標エネルギースペクトルの設定事例を示した。応答スペクトルが等しくても、エネルギースペクトルは実効継続時間によって変動し、周期 0.5~6 秒の平均的な傾向として、実効継続時間が 2 倍になるとエネルギースペクトルは約 1.2 倍になることを示した。また、南海トラフ沿いの巨大地震を対象に、国土交通省(2015)から公表された簡略化応答スペクトルと 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録の実効継続時間を用いて、減衰関数の提案式に基づき、特定の地点における地震動のエネルギースペクトルを評価する方法を示した。提案式に基づき評価したエネルギースペクトルと国土交通省(2015)の公表波のエネルギースペクトルを比較し、対象地点におけるサイト特性、震源距離または震源断層と対象地点の幾何学的な位置関係が同等の条件をもつ観測記録の実効継続時間を用いることで、両者のエネルギースペクトルの対応を概ね説明できることを示した。また、考え得る不確かさとして、減衰関数のばらつきを考慮することが重要であることを指摘した。提案式に基づくエネルギースペクトルは、既往の予測波の評価尺度として有用であると考えられる。

第 5 章では、本論文の結論として、長周期長時間地震動記録に基づく応答スペクトルとエネルギースペクトルの関係、ならびに設計用入力地震動の目標エネルギースペクトルの評価について総括するとともに、今後の課題と展望について述べた。

本論文は、応答スペクトルとエネルギースペクトルを同時に規定した設計用入力地震動評価方法の一案を含んでおり、長周期長時間地震動に対する超高層建物や免震建物等の設計にとって有益な知見となり得る。また、既往の設計用入力地震動評価手法や応答評価手法の比較対象として有用な役割を担うと考えられる。

『長周期長時間地震動記録に基づく設計用入力地震動の
応答スペクトルとエネルギースペクトルの関係に関する研究』

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的	2
1.2 既往研究	4
1.3 本論文の構成	14
1章の参考文献	15

第2章 観測記録に基づくf値の定性的評価

2.1 はじめに	18
2.2 f値の定義	19
2.3 観測記録の周期帯毎のf値	22
2.4 震源・伝播経路・サイト特性とf値の関係	32
2.5 まとめ	62
2章の参考文献	63

第3章 観測記録に基づく応答スペクトルとエネルギースペクトルの関係

3.1 はじめに	66
3.2 減衰関数の定義と評価方法	67
3.3 長周期長時間地震動の減衰関数の概観	70
3.4 観測記録に基づく減衰関数の導出	74
3.5 提案式と従来式との対応	86
3.6 エネルギースペクトルの推定に関する提案式の妥当性の検証	94
3.7 提案式の適用範囲の考察	106
3.8 まとめ	113
3章の参考文献	115

第4章 提案式に基づくエネルギースペクトルの設定事例および評価

4.1 はじめに	118
4.2 設計用入力地震動の継続時間の解釈	119
4.3 告示スペクトルを用いた場合のエネルギースペクトルの設定事例	120
4.4 南海トラフ地震の簡略化スペクトルを用いた場合のエネルギースペクトルの評価	126
4.5 まとめ	189

4 章の参考文献	190
----------------	-----

第 5 章 結論

5.1 本論文のまとめ	192
5.2 今後の展望と課題	194

本論文に関連する発表論文・口頭発表一覧

謝辞

第 1 章

序論

1.1 研究の背景と目的

周期数秒以上の長周期成分を有する地震波が大規模平野などの堆積層が厚く発達した場所に達すると、長周期成分の揺れの増大と数分間にも及ぶ継続時間の伸長を伴う、いわゆる長周期長時間地震動が生じる。2003年十勝沖地震の際に、長周期かつ長時間の揺れにより、石油タンクのスロッシングが発生し、大きな被害をもたらした。この地震以来、超高層建物等の設計用地震動として長周期地震動を検討することの必要性が広く認識されるようになった。そして、2011年東北地方太平洋沖地震の際にも、震源から遠く離れた堆積盆地上の首都圏の超高層建物において、長周期かつ長時間の地震動により10分以上も大きな揺れが続き、これを契機に「長周期長時間地震動」という言葉が広く用いられるようになった。また、このような地震動が構造物の応答に与える影響とその評価方法が課題として再認識された。近い将来にその発生が懸念されている南海トラフ沿いの地震や相模トラフ沿いの地震においても、長周期長時間地震動により長周期構造物が共振し大きく揺れるとともに、長時間にわたる繰り返しの揺れにより建物の損傷が進行、拡大することが懸念される。

長周期長時間地震動では、継続時間が短い地震動と比べて、建物に入力するエネルギーが増大するため、長周期構造物は共振現象を繰り返し、揺れの継続時間が長くなる。最大応答値と累積応答値の観点に立てば、たとえば、南海トラフ沿いの南海域および東南海域の連動地震の予測波に対する超高層建物の応答解析では、最大応答値が連動地震と単独地震で同程度であっても、継続時間の伸長に伴って連動地震のほうが単独地震よりも入力エネルギーは大きくなる場合があるとの検討結果が報告されている。このような地震動に対して、最大応答値と累積応答値の両方を適切に推定する方法の開発が課題のひとつであり、研究的な取り組みが進みつつある。応答低減係数または減衰関数は、最大応答と累積応答の対応関係を示す指標であるため、構造物に入力される累積エネルギーの推定に有効と考えられる。長周期地震動の評価指標である単位地震動の繰り返し数 f 値は減衰関数を用いて表され、ここでの減衰関数はエネルギースペクトルと速度応答スペクトルの比率として定義されている。応答低減係数に関しては、いくつかの既往研究があるが、それらの導出において対象とした地震動の継続時間は短く、短周期帯の評価に重きが置かれていたため、長周期帯の推定精度には未だ課題を残している。さらに、応答低減係数は入力地震動によって変動するが、その変動幅や要因についてはあまり議論されていない。

長周期地震動または長周期長時間地震動の観点から、設計用入力地震動について考える。告示波に代表される設計用模擬地震動の時刻歴波形を作成する際には、その振幅特性と位相特性の両方を適切に設定する必要がある。しかしながら、現行の告示では、振幅特性の応答スペクトルのみが規定され、位相特性と経時特性については60秒以上の継続時間が必要ということ以外に規定はなく、位相の選択基準も明示されていない。そのため、実務においては、告示スペクトルに組み合

わせる位相として、従来から用いられているいわゆる標準波（El Centro 記録、Taft 記録、八戸記録）の観測位相あるいはランダム位相が標準的な選択肢となっており、地震動の継続時間が短く設定される場合が多い。一方で、近年、長周期地震動の振幅特性と位相特性に関する研究が行われるようになってきた。既往の研究では、振幅特性として加速度応答スペクトルまたはエネルギースペクトル、位相特性として位相スペクトルを指標に観測記録を分析し、それぞれの経験式を求め、長周期地震動波形を予測する方法が提案されている。これまでに、地震動の入力エネルギーについて定量的に評価された例はこの研究のみである。しかし、この経験式に基づき作成された波形の応答スペクトルとエネルギースペクトルの両者の対応関係に関して、観測記録を用いた検証はなされていない。

以上のように、長周期長時間地震動をはじめとする継続時間の長い地震動に対する長周期構造物の耐震性能検証のためには、建物応答評価と設計用地震動評価の双方において、最大応答値と入力エネルギーの両方の観点が必要であるが、両方を兼ね備えた方法の開発は発展途上と言える。設計実務では、最大応答値に加えて累積応答値についても検討する事例が増えているため、それに対応して、地震動の応答スペクトルに加えてエネルギースペクトルの評価も必要と考えられる。

本論文は、長周期長時間地震動を含めた継続時間の長い地震動の実記録に基づき減衰関数を定量的に評価し、目標応答スペクトルから目標エネルギースペクトルを評価する方法を示すことを目的とする。減衰関数が定まれば、目標応答スペクトルまたは目標エネルギースペクトルのどちらか一方が決まれば他方を設定することができるため、応答スペクトルとエネルギースペクトルを同時に規定できるようになる。従来の減衰関数には、継続時間と周期帯の適用範囲に関する課題があり、それによって様々な入力地震動に対する構造物の安全性を過大にも過小にも評価し得る可能性を有していた。近年、地震観測が広域かつ稠密に行われるようになり、地震計の精度も高まってきたことで、継続時間の長い地震動記録が数多く得られるようになった。このような状況の変化を踏まえ、本論文では国内の主要な被害地震を中心に、継続時間が長い観測記録を多く収集し、従来の減衰関数の適用範囲の長周期側への拡張を試みる。さらに、その減衰関数を用いて、目標応答スペクトルから目標エネルギースペクトルを評価する方法の一案を示す。

本論文の成果は、長周期長時間地震動に対する超高層建物や免震建物等の設計法に資する知見といえる。また、既往の設計用地震動評価手法や応答評価手法の比較対象として有用な役割を担うと考えられる。

1.2 既往研究

長周期長時間地震動に対する長周期構造物の耐震安全性を評価するためには、最大応答値と累積応答値または入力エネルギーの観点が必要である。本論文では、長周期長時間地震動を含めた継続時間の長い地震動の実記録を対象として、それらの減衰関数を評価する。減衰関数は応答スペクトルとエネルギースペクトルの比率で定義されるため、減衰関数を調べることで、最大応答値と累積応答値の関係の評価にも関連づけることができると考えられる。

ここでは、本論文の位置づけに関わる既往研究として、最大応答値と累積応答値の応答予測に関する研究、減衰関数（応答低減係数）に関する研究、設計用地震動に関する研究を紹介し、現段階で明らかにされていることと、課題として残されていることを整理する。

1.2.1 最大応答値と累積応答値の応答予測に関する研究

(1) 秋山・北村(2006)：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応

秋山・北村(2006)は、継続時間の長い地震動ではある単位地震動がくり返し発生していると仮定し、その単位地震動の反復数 f 値を次式で定義した。

$$f = \left(\frac{{}_0F(h)}{F(h)} \right)^2 = \left(\frac{{}_0\bar{S}_{V,h} / {}_0\bar{V}_{E,h=0.1}}{\bar{S}_{V,h} / \bar{V}_{E,h=0.1}} \right)^2 = \left(\frac{\bar{V}_{E,h=0.1} / \bar{S}_{V,h}}{{}_0\bar{V}_{E,h=0.1} / {}_0\bar{S}_{V,h}} \right)^2 \quad (1.1)$$

$$F(h) = \bar{S}_{V,h} / \bar{V}_{E,h=0.1} \quad (1.2)$$

$${}_0F(h) = {}_0\bar{S}_{V,h} / {}_0\bar{V}_{E,h=0.1} \quad (1.3)$$

ここに、 $F(h)$ は対象とする地震動に対する構造物の減衰関数、 $\bar{S}_{V,h}$ は任意の減衰定数 h のときの周期0～10秒における平均速度応答スペクトル、 $\bar{V}_{E,h=0.1}$ は10%減衰の周期0～10秒における平均エネルギースペクトル、 ${}_0F(h)$ は単位地震動に対する構造物の減衰関数、 ${}_0\bar{S}_{V,h}$ は任意の減衰定数 h のときの単位地震動の \bar{S}_V 、 ${}_0\bar{V}_{E,h=0.1}$ は10%減衰の単位地震動の \bar{V}_E である。

$f=3$ の場合の応答波形と入力エネルギーの時刻歴を図1-1に示す。図1-1より、最大応答値は1単位地震動によって決まり、入力エネルギーは単位地震動のくり返し数 f 値によって決まることがわかる。このように、 f 値は、ある対象地震動による最大応答値が単位地震動と等しく、入力エネルギーを単位地震動の入力エネルギーの f 倍と考えるものである。すなわち、対象地震動の応答スペクトルは単位地震動の応答スペクトルは等しく、対象地震動のエネルギースペクトルは単

位地震動のエネルギースペクトルの \sqrt{f} 倍になる。標準波といくつかの長周期地震動（多くは震源を特定した模擬地震動）の f 値と実効継続時間 ${}_e t_0$ の関係を図1-2に示す。図1-2のように、実効継続時間の長い地震動では、 f 値は実効継続時間 ${}_e t_0$ に比例して増加傾向を示す。

さらに、応答予測についても言及しており、地震時における基本的な構造形式の構造物の最大変形と累積塑性変形の対応関係に f 値を導入した予測式を提案している。1 質点振動系の応答解析結果と予測式から求まる予測値を比較し、ばらつきはあるものの、周期帯で均してみれば、両者が概ね対応することを示している。

f 値の有用性について、秋山らは主に以下の3つの結論を述べている。(1)最大変形と累積塑性変形の関係から応答値を近似できる。(2) S_V と V_E を評価できる。(3)地震動の継続時間や入力エネルギーを評価できる。

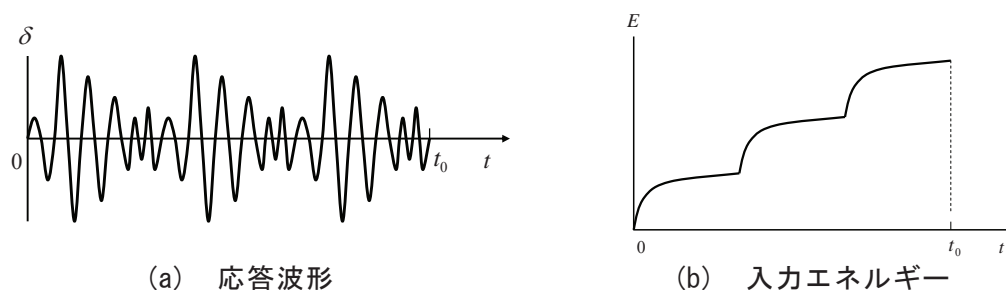


図1-1 $f=3$ の場合の応答の時刻歴（秋山・北村，2006）

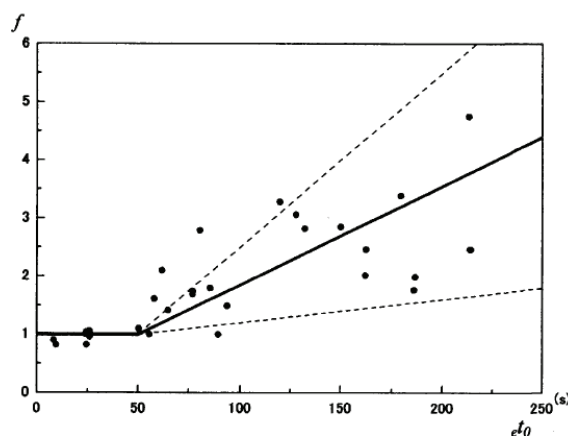


図3 f 値と ${}_e t_0$ の関係

図1-2 f 値と実効継続時間 ${}_e t_0$ の関係（秋山・北村，2006）

(2) 佐藤・他(2014)：履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法

佐藤・他(2014)は、既往の履歴ダンパーのみの制振構造における応答予測式や粘性ダンパーのみの制振構造における応答予測式、履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した免震構造における応答予測式を拡張し、履歴ダンパーと粘性ダンパー

を併用した制振構造における応答予測式を提案した。

制振部材のエネルギー評価において、秋山・北村(2006)が提案した単位地震動の反復数 f 値と単位地震動の等価繰り返し数を導入した応答予測式を導出し、予測結果と応答解析結果の比較から式の妥当性を検証するとともに、広範な地震動特性にも対応した応答予測ができ得る式であることを示している。

建物モデルを構成するパラメータによる応答値のばらつきについては多くの検討ケースをもって示されている一方、入力地震動による応答値のばらつきに関しては、限定的な地震動を対象としているため、大局的な傾向を示すに留まっている。

(3) 木村・他(2015)：東海・東南海・南海単独地震の応答に基づく三連動地震による超高層建物の最大値と累積値の応答評価法

木村・他(2015)は、単独地震の応答解析結果を用いて、連動地震による超高層建物の最大応答値と累積応答値を予測する応答評価法を示した。

三連動地震の応答スペクトルはそれぞれの単独地震の応答スペクトルの二乗和平方根で、三連動地震のエネルギースペクトルはそれぞれの単独地震の応答スペクトルの総和で概ね評価できることを示した。また、そのスペクトル上での考え方を、層間変形角、部材の塑性率、および層や部材の累積塑性変形倍率の応答予測に拡張した方法を提示した。

ただし、限定的なケースの地震動に対する検討であるため、震源モデルの各セグメントの破壊開始点や破壊開始時刻の差の不確かさによる応答予測結果のばらつきが今後の課題として考えられた。

1.2.2 減衰関数（応答低減係数）に関する研究

長周期長時間地震動では、継続時間が短い地震動と比べて、建物に入力するエネルギーが増大するため、長周期構造物は共振現象を繰り返し、揺れの継続時間が長くなる。応答低減係数または減衰関数は、最大応答と累積応答の対応関係を示す指標であるため、構造物に入力される累積エネルギーの推定に有効と考えられる。また、応答低減係数は最大応答予測に有用であり、簡便で効率的に耐震性能を評価できる指標としても従来から用いられている。

先に、応答低減係数と減衰関数の言葉の定義について述べておく。応答低減係数は、一般的には、0%または5%減衰の応答スペクトルに対する任意の減衰定数の応答スペクトルの比率として定義される。一方、減衰関数は、10%減衰のエネルギースペクトルに対する任意の減衰定数の速度応答スペクトルの比率として秋山・北村(2006)により定義されている。多くの場合、0%減衰の速度応答スペクトルは、加速度フーリエ振幅スペクトルと同等かそれよりも若干大きくなること、さらに10%減衰のエネルギースペクトルは加速度フーリエ振幅スペクトルを平滑化したものであることを踏まえると、0%減衰の速度応答スペクトルと10%減衰のエネルギースペクトルはほぼ同等とみなすことができる。

本論文では、秋山・北村(2006)に倣い、減衰関数を用いるが、減衰関数と応答低減係数を同じ意味と捉えて用いている。本節では、元文献に合わせた表現を用いる。

(1) 柴田(1981)：最新耐震構造解析

柴田(1981)は、1968年十勝沖地震の仙台および八戸記録、1940年 Imperial Valley 地震の El Centro 記録、1952年 Kern County 地震の Taft 記録を対象に、0%減衰の応答スペクトルに対する任意の減衰 h の応答スペクトルの応答低減係数 F_h を調べ、周期0.1～5秒の応答低減係数 F_h を(1.4)式で表している。

$$F_h = S_h / S_{h=0} = 1 / (1 + \alpha h) \quad (1.4)$$

ここに、 $S_{h=0}$ は0%減衰の応答スペクトル、 S_h は任意の減衰定数 h の応答スペクトルである。これらの地震動に対しては、係数 α が10～20程度の範囲であることを示している。この知見を反映した応答低減係数は、現在の限界耐力計算に用いられている。なお、(1.4)式からわかるように、周期に依存しない表現となっている。

(2) 笠井・他(2003)：等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法

笠井・他(2003)は、実効継続時間が10～40秒程度の観測記録31波を対象に、周期0.2～3秒の擬似速度応答スペクトルの応答低減係数 D_h を次式で整理している。

$$D_h = \sqrt{(1+\alpha h_0)/(1+\alpha h_{eq})} = \sqrt{(1+25h_0)/(1+25h_{eq})} \quad (1.5)$$

ここに、 h_0 は初期減衰定数、 h_{eq} は等価減衰定数である。 h_0 は0.02または0.05で、 h_{eq} が $h_0 \sim 0.4$ の範囲を対象としている。なお、日本建築センターの模擬波(BCJ-L1とBCJ-L2)では減衰による応答の低減効果が著しく、観測記録とは分けて考える必要があるとしており、BCJ-L1に対しては $\alpha=97$ 、BCJ-L2に対しては $\alpha=75$ を求めている。

笠井・他(2003)の付録において、観測記録31波について、実効継続時間と応答低減係数の関係を分析し、両者の相関がほとんど認められないことを示している。ただし、対象とした観測記録の実効継続時間の範囲は10～40秒程度と短い。また、周期との相関についても分析しており、周期0.2～2秒の範囲では応答低減係数と周期にほとんど相関がないことを示している。周期2秒以上では、応答低減係数が徐々に増大する傾向を示すが、(1.5)式を周期8秒まで拡張して用いても、その誤差は大きくないとしている。

(4) 秋山・北村(2006)：エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応

秋山・北村(2006)は、0%減衰の速度応答スペクトルと10%減衰のエネルギースペクトルはほぼ同等とみなすことができることを利用して、10%減衰の平均エネルギースペクトル $\bar{V}_{E,h=0.1}$ に対する任意の減衰定数 h の平均速度応答スペクトル $\bar{S}_{V,h}$ の比率を減衰関数 $F(h)$ として、次式で表現している。

$$F(h) = \bar{S}_{V,h} / \bar{V}_{E,h=0.1} \quad (1.6a)$$

$$\bar{S}_{V,h} = \frac{\int_0^{T_m} S_{V,h}(T) dT}{T_m}, \quad \bar{V}_{E,h=0.1} = \frac{\int_0^{T_m} V_{E,h=0.1}(T) dT}{T_m} \quad (1.6b,c)$$

また、弾性1自由度系におけるエネルギーのつり合い方程式に基づき、免制震部材等の性能評価指標の一つである等価繰返し数 n をパラメータとして、減衰関数 $F(h)$ を次式でも表している。

$$F(h) = 1 / \sqrt{1 + 4\pi n} \quad (1.7)$$

なお、秋山は、減衰関数 $F(h)$ を次式のように読み替えて用いている。

$$F(h) = V_{D,h} / V_{E,h=0.1} \quad (1.8)$$

ここに、 $V_{E,h=0.1}$ は 10%減衰の弾性 1 自由度系の総入力エネルギーの速度換算値、 $V_{D,h}$ は減衰定数 h の弾塑性系の損傷に寄与するエネルギー（総入力エネルギーから減衰により消費するエネルギーを除いたエネルギー）の速度換算値である。

いずれもある周期帯あるいは特定の周期における式であり、減衰関数を周期に依存しない関数として表している。

(5) 三宅(2006)：耐震設計規範としての最大応答と累積応答の関係に関する考察

三宅(2006)は、地震動波形の包絡形を仮定し、波数（固有周期に対する継続時間の比）をパラメータとして、ランダム振動理論に基づき、速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの比率を近似理論式として次式で表している。

$$\frac{S_V}{V_E} = \sqrt{-\frac{a}{4\pi h N_0} \cdot \ln\left\{1 - F_0^{2cN_0}\right\}} \quad (h=0.1 \text{ の場合}) \quad (1.9)$$

ここに、 a と c は地震動波形の包絡関数を決定する係数であり、地震動の種類によらず $a=3$ 、 $c=0.25$ とする。 N_0 は波数（=主要動の継続時間／固有周期）である。 F_0 は非超過確率であり、平均的には 0.5 とする。また、減衰補正係数 F_h を次式で表している。

$$F_h = \sqrt{\frac{h_0}{h}} \quad (1.10)$$

ここに、 h_0 は観測記録を近似する際に用いた値で 0.1 とする。(1.9)式に(1.10)式を乗じれば、任意の減衰定数 h における速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの比率を求めることができる。

(6) 岡野・他(2009)：応答スペクトルとエネルギースペクトルのスケーリング

岡野・他(2009)は、三宅(2006)の近似理論式の高精度化を図り、擬似速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの比率を次式で表している。

$$\frac{p S_V}{V_E} = \sqrt{\frac{\alpha_d}{8\pi h n}} \cdot \sqrt{(1 - e^{-4\pi h n})} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{0.424 + \ln(4\pi h n + 1.78)} \quad (1.11)$$

ここに、 α_d は岡野・他(2009)が同文献中で定義した主要動で供給されるエネルギーの全入力エネルギーに対する比率、 n は波数（=主要動の継続時間／固有周期）

である。

岡野・他(2009)は、最長で主要動の継続時間が 140 秒程度の観測記録を含む 35 波の周期 0.1～5 秒の帯域について(1.11)式を検証し、良好な評価精度が得られることを示している。ただし、長周期成分を多く含む地震動では、周期帯毎の継続時間の差、すなわち継続時間の周期特性の影響が顕著に現れるため、誤差がやや大きくなるという課題が残った。

(7) 平石・他(2016)：エネルギーに立脚した非定常弾性応答における減衰による 応答低減係数の評価

平石・他(2016)は、弾性 1 自由度系の最大応答直前の 1 サイクルに着目し、エネルギーのつり合い方程式に基づき、最大応答変位・最大応答速度・最大応答加速度とも共通な応答低減係数 α を(1.12)式で仮定し、理論解として(1.13)式を得ている。

$$\frac{y_{h\max}}{y_{0\max}} = \alpha \quad (1.12a)$$

$$\alpha = \frac{4\pi h_0 + (\gamma_0 - 1/\gamma_0)}{4\pi h + (\gamma_0 - 1/\gamma_0)} \cong \frac{10h_0 + 0.8(\gamma_0 - 1/\gamma_0)}{10h + 0.8(\gamma_0 - 1/\gamma_0)} \quad (1.12b)$$

ここに、 $y_{h\max}$ は減衰定数 $h=h$ のときの最大応答変位、 $y_{0\max}$ は減衰定数 $h=h_0$ (基準減衰定数) のときの最大応答変位である。 γ_0 は平石・他(2016)が定義した応答変位の突出比である。 $\gamma_0=1$ の場合は長周期地震動で共振し、定常ループを描くときの解となる。無減衰で完全に共振する条件 ($h=0$ 、 $\gamma_0=1$) のとき、(1.12b)式は発散する。

周期 0.7～3 秒、減衰定数 $h=0.05\sim0.4$ を対象として、標準波と告示波を用いて(1.12b)式の妥当性を検証している。突出比 γ_0 は地震動と周期に影響され、告示波で 1.5～2 程度、標準波で 2～3 程度となる。長周期地震動で共振するような場合では 1 に近い値になる可能性を示唆している。

(8) 安井・他(2010)：パルス地震動に対する 1 自由度系最大応答理論解と応答特性

安井・他(2010)は、パルス性地震動を対象として、減衰定数 h とパルス周期比 T/T_p を評価し、正弦波パルス 1 波に対する弾性 1 自由度系の応答低減係数の近似理論式を提案し、ランダム振動理論に基づく応答低減係数とは傾向が異なることを示している。

1.2.3 設計用入力地震動に関する研究

告示波に代表される設計用模擬地震動の時刻歴波形を作成する際には、その振幅特性と位相特性の両方を適切に設定する必要がある。しかしながら、現行の告示では、振幅特性の応答スペクトルのみが規定され、位相特性と経時特性については60秒以上の継続時間が必要ということ以外に規定はなく、位相の選択基準も明示されていない。そのため、実務においては、告示スペクトルに組み合わせる位相として、従来から用いられているいわゆる標準波（El Centro 記録、Taft 記録、八戸記録）の観測位相あるいはランダム位相が標準的な選択肢となっており、地震動の継続時間が短く設定される場合が多い。一方で、近年、長周期地震動の振幅特性と位相特性に関する研究が行われるようになってきた。

(1) 佐藤・他(2010, 2012, 2014)、建築研究所(2010, 2013a, 2013b)：応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成に関する一連の研究

佐藤・他(2010)および建築研究所(2010)は、全国多数の強震記録を用いて、長周期成分を含む周期 0.1～10 秒を対象として、長周期設計用地震動作成のための振幅特性と位相特性を設定する経験式を提案した。なお、地震種別等による経験式の区別はしていない。振幅特性に関しては、マグニチュード、伝播経路の内部減衰（ Q 値）・幾何減衰、サイトの地盤増幅率を考慮し、目標スペクトルとする絶対加速度応答スペクトル S_A ($h=0.01, 0.05$) とエネルギースペクトル V_E ($h=0.05$) の距離減衰式を求めている。位相特性に関しては、震源・伝播・サイト特性を考慮した群遅延時間の平均値と標準偏差の経験式を作成している。そして、作成した経験式を用いて 2004 年紀伊半島沖地震の此花と津島における波形をシミュレーションし、それらの応答スペクトルと加速度波形が観測記録を説明できることを示した。なお、エネルギースペクトルの再現性については言及していない。

佐藤・他(2012)および建築研究所(2013a)は、佐藤・他(2010)および建築研究所(2010)のデータセットに 2011 年東北地方太平洋沖地震を除く 19 個の海溝型地震を加えたうえで、プレートのよる伝播特性の違いや関東平野における深部地下構造のサイト地盤増幅率の違い等を考慮し、加速度応答スペクトル S_A ($h=0.05$) と位相スペクトルの経験式を改良した。なお、エネルギースペクトルの経験式については触れていない。この改良経験式を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震のシミュレーションを行い、擬似速度応答スペクトルと速度波形が観測記録をほぼ再現することを示した。

佐藤・他(2010)および建築研究所(2010)、佐藤・他(2012)および建築研究所(2013a)では地震観測点における時刻歴波形を予測する方法であったのに対し、佐藤・他(2014)および建築研究所(2013b)は任意地点における予測方法を構築した。3 次元地下構造モデルを用いて、大阪平野・濃尾平野・関東平野における加速度応答スペクトル S_A ($h=0.05$) の地盤増幅率と位相スペクトルのサイト係数の面的評価を行

うためのサイト特性の予測式を作成し、既往の予測波との比較を通して、予測式の妥当性を示した。この成果は、国土交通省(2016)の基準整備促進事業の設計用長周期地震動の作成方法としてデータとともに公開され、超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策に反映されている。

(2) 山根・長橋(2002a, 2002b, 2003, 2005): 位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動の作成に関する研究

位相特性について追究した研究事例として、加速度波形と位相差分分布の類似性を利用した模擬地震動作成手法も提案されている。観測記録の位相差分分布の標準偏差を指標として地震動の経時特性を評価し、震源・伝播特性に応じた位相差分特性を与えるための位相の選択基準を示している。

山根・長橋の模擬波作成手法では、観測記録のフーリエ位相スペクトルを利用することを前提としており、位相特性の設定にあたっては、観測記録のデータセットの中から適切な位相を選択する。その選択基準として位相差分分布の標準偏差 σ/π を採用し、震源規模に関する条件と震源距離から σ/π を定量化している。一方、振幅特性は、 ω^{-2} モデルに基づく加速度震源スペクトルに幾何減衰および一次元重複反射理論に基づく地盤の伝達関数を乗じて加速度フーリエ振幅スペクトルを設定する。なお、地震モーメントや短周期レベルまたはライズタイムのパラメータは、既往の研究成果を用いる。設定したフーリエ位相スペクトルと加速度フーリエ振幅スペクトルを組み合わせで作成した模擬波の応答スペクトル、エネルギースペクトル、加速度波形が、観測記録を再現しうることを示し、提案手法の有用性を示した。

1.2.4 既往研究の課題の総括

最大応答値と累積応答値の応答予測に関する最近の既往研究において、最大応答値と累積応答値の対応関係、あるいは応答スペクトルとエネルギースペクトルの対応関係に基づく応答予測式が提案されている。これらの研究では、入力地震動特性による応答値のばらつきに関しては、いずれも限定的な地震動を対象としているため、まだ検討の余地があると言える。既往の応答予測式の予測精度をより向上させるためには、地震動特性の観点からの分析も必要と考えられる。

従来の減衰関数または応答低減係数に関しては、長周期長時間地震動の観点から立つと、以下のような課題が挙げられる。まず、その導出において対象とした地震動の継続時間が短いことである。従来は、主に主要動継続時間が60秒程度以下の地震動記録や模擬波、あるいは60秒以上であっても極めて限定的な地震動を対象としていたため、それよりも継続時間の長い地震動への適用性を確かめる必要がある。次に、短周期帯の評価に重きが置かれていることである。当時の強震計の精度の限界から、長周期成分にノイズが含まれ、信頼性が低かった。以上より、周期3秒程度以下の短周期帯の応答低減係数または減衰関数については知見が蓄積しつつあるが、それよりも長周期帯については未だ課題が残されていると言える。

佐藤らの一連の研究による経験式に基づく模擬波作成方法は、加速度応答スペクトルまたはエネルギースペクトルのいずれか一方を目標振幅スペクトルとし、それと位相スペクトルを組み合わせる方法であり、応答スペクトルとエネルギースペクトルを同時に規定するものではない。エネルギースペクトルを定量的に評価した研究事例は佐藤・他(2010)のみであるが、経験式の改良が行われていく中で、加速度応答スペクトルと位相スペクトルの評価のみとなり、エネルギースペクトルについては触れられなくなった。なお、これらの経験式に基づき作成された波形の応答スペクトルとエネルギースペクトルの両者の対応関係に関して、観測記録を用いた検証はなされていない。また、2011年東北地方太平洋沖地震の本震の記録に関しては、明らかに波群が2つ以上からなる観測点は検討対象外とされている。そして、最終的な検討結果として、応答スペクトルを過小評価する懸念があることから、回帰式を作成する際のデータセットに2011年東北地方太平洋沖地震は含まれていない。山根・長橋の方法は、加速度波形に波群が複数あったとしても、位相差分分布では1つの山として評価されるため、位相差分分布の標準偏差では主要動の継続時間を過小評価する可能性があり、東北地方太平洋沖地震などの観測記録を統一的な方法で評価することは難しく、大規模な連動型地震等の予測への適用には工夫が必要である。

1.3 本論文の構成

本論文は、全5章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べ、既往の研究を整理し、本論文の構成を示した。

第2章では、単位地震動の繰り返し数 f 値に着目し、 f 値と地震動の震源・伝播・サイト特性との対応について分析する。2011年東北地方太平洋沖地震、2003年十勝沖地震本震および最大余震の観測記録を用いて、周期帯毎に f 値とその構成要素である平均擬似速度応答スペクトルおよび平均エネルギースペクトルの地理的な分布を示し、マグニチュード・震源距離・サイト増幅特性との対応関係を概略的に捉える。そして、 f 値のもつ特性について、周期帯による違いを踏まえながら定性的に評価する。

第3章では、応答スペクトルとエネルギースペクトルの比率を表す減衰関数と実効継続時間の関係に着目し、両者の関係を定量的に整理する。はじめに、既往研究の減衰関数や応答低減係数について整理するとともに、周期帯毎の実効継続時間の違いが減衰関数に及ぼす影響について、固有周期と減衰関数の関係から確認する。ついで、実効継続時間をパラメータとして、エネルギースペクトルに漸近性が認められなかった地震動を対象に、減衰関数の平均的な経験式とその変動幅を周期帯毎（0.5～1秒、1～2秒、2～6秒）に導出する。また、導出した経験式（以後、提案式とよぶ）と既往研究で示されている式との対応について考察する。さらに、提案式を用いて、長周期長時間地震動の5%減衰の観測擬似速度応答スペクトルから10%減衰のエネルギースペクトルを推定し、既往の推定式よりも提案式のほうが長周期帯の精度が向上することを示し、提案式が有効であることを示す。最後に、提案式の適用範囲の考察として、一定以上の推定精度が確保できるような地震動の基準を明らかにするとともに、パルス性地震動に対する適用性についても言及する。

第4章では、第3章で導出した減衰関数の提案式により、建築基準法の告示スペクトル（レベル2）に基づく設計用目標エネルギースペクトルの設定事例を示す。また、南海トラフ沿いの巨大地震を例に、国土交通省(2015)から公表された簡略化応答スペクトルと観測記録の実効継続時間を用いて、減衰関数の提案式に基づき、想定地震の特定の地点における地震動のエネルギースペクトルを評価する方法を示す。

第5章では、本論文の結論として、長周期長時間地震動記録に基づく応答スペクトルとエネルギースペクトルの関係、ならびに設計用入力地震動の目標エネルギースペクトルの評価について総括する。そして最後に、本研究の今後の課題と展望を述べる。

1 章の参考文献

- 1) 秋山宏, 北村春幸: エネルギースペクトルと速度応答スペクトルの対応, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp.37-43, 2006.10.
- 2) 佐藤大輔, 北村春幸, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 山口路夫, 脇田直弥, 綿貫雄太: 履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第699号, pp.631-640, 2014.5.
- 3) 木村暢志, 北村春幸, 佐藤利昭, 木村雄一, 青野英志, 山本優: 東海・東南海・南海単独地震の応答に基づく三連動地震による超高層建物の最大値と累積値の応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第712号, pp.873-883, 2015.6.
- 4) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚: 等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第571号, pp.53-62, 2003.9.
- 5) 三宅辰哉: 耐震設計規範としての最大応答と累積応答の関係に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.135-142, 2006.1.
- 6) 岡野創, 永野正行, 今村晃, 徳光亮一, 土方勝一郎: 応答スペクトルとエネルギースペクトルのスケーリング, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第637号, pp.477-486, 2009.3.
- 7) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 第1版, 森北出版株式会社, 1981.
- 8) 平石久廣, 朱盈, 大井希良里, 大塚悠里, 大出大輔, 稲井栄一: エネルギーに立脚した非定常弾性応答における減衰による応答低減係数の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第719号, pp.29-37, 2016.1.
- 9) 安井雅明, 西影武知, 見上知広, 亀井功, 鈴木恭平, 林康裕: パルス地震動に対する1自由度系最大応答理論解と応答特性, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第650号, pp.731-739, 2010.4.
- 10) 秋山宏: 建築物の耐震極限設計, 第2版, 東京大学出版会, 1987.
- 11) 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明, 関松太郎: 応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成, 日本建築学会構造系論文集, 第649号, pp.521-530, 2010.3.
- 12) 建築研究所: 長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討, 建築研究資料, No.127, 2010.12.
- 13) 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明: 長周期地震動の経験式の改良と2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第4号(特集号), 2012.
- 14) 建築研究所: 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討ー長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ3連動地震による超高層・免震建物の応答解析ー, 建築研究資料, No.144, 2013.8.
- 15) 建築研究所: 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討ー南海ト

ラフ4連動地震による超高層・免震建物の応答解析－，建築研究資料，No.147，2013.9.

- 16) 佐藤智美，大川出，佐藤俊明，藤堂正喜，西川孝夫：サイト固有の特性を反映した経験式に基づく南海トラフ沿いの巨大地震に対する長周期地震動予測，日本建築学会構造系論文集，Vol.79，No.695，pp.37-46，2014.1.
- 17) 山根尚志，長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その1 位相差分分布と地震動経時特性の関係に関する理論的背景，日本建築学会構造系論文集，第553号，pp.49-56，2002.5.
- 18) 山根尚志，長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その2 位相差分分布と震源・伝播・地盤特性の関係に関する考察，日本建築学会構造系論文集，第559号，pp.55-62，2002.9.
- 19) 山根尚志，長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その3 ω^2 モデルに基づいた地震動評価手法，日本建築学会構造系論文集，第572号，pp.55-64，2003.10.
- 20) 山根尚志，長橋純男：位相差分特性を考慮した設計用模擬地震動作成に関する研究 その4 ω^2 モデルで規定したフーリエ振幅と位相差分の標準偏差を基準として選択したフーリエ位相を用いた模擬地震動作成手法，日本建築学会構造系論文集，第590号，pp.45-53，2005.4.

第2章

観測記録に基づくf値の定性的評価

2.1 はじめに

秋山・北村(2006)は、構造物の最大変形と累積塑性変形をそれぞれ速度応答スペクトル S_V (以後、 S_V と呼ぶ) とエネルギースペクトル V_E (以後、 V_E と呼ぶ) に置き換え、両者の対応関係を単位地震動のくり返し数 f 値で表した。そして、 f 値を用いて、最大変形と累積塑性変形の関係から応答値を近似できること、 S_V と V_E の関係の評価できること、地震動の継続時間あるいは入力エネルギーを評価できることを明らかにしている。秋山・北村(2006)が示した f 値の有用性を発展させると、 f 値は周期に対応した地震動の継続時間の設定や位相特性の選定をする際の評価指標となり得ると考えられる。

超高層建物等の設計には、最大振幅だけでなく、経時特性についても同時に考慮された設計用入力地震動を用いることが重要と考えられる。 V_E はフーリエ振幅スペクトルを減衰($h=0.1$)によって平滑化したもので、本質的には両者は等価と考えられており、 V_E を用いた模擬波の作成も試みられている。 V_E が定まれば、それを振幅特性として用いることができる。作成方法としては、目標 S_V を設定し、定量化された f 値を介して V_E と経時特性を定める方法、あるいは、目標 S_V および目標 V_E を設定し、それらから求まる f 値を経時特性の設定に用いて、目標 S_V と目標 V_E の両方に対して安全側となる模擬波を作成する方法が考えられる。以上のような方法が提案できれば、サイトによるスペクトル形状の違いを簡単に調整することができ、告示波の最大応答値を変えることなく入力エネルギーの不足を補うことが可能になると思われる。

本章では、 f 値の定性的評価を行う。なお、周期 0.1～1 秒、1～2 秒、2～3 秒、3～10 秒の各周期帯を対象とする。このように周期を分割することで、周期帯毎の波群の平均的な経時特性が明確になると考えられる。

はじめに、2011 年東北地方太平洋沖地震、2003 年十勝沖地震の本震、および 2003 年十勝沖地震の最大余震の K-NET 観測波形から、周期帯毎に応答の主軸方向を求め、その主軸方向の平均 S_V (以後、 \bar{S}_V と記す)、平均 V_E (以後、 \bar{V}_E と記す) および f 値を求める。また、 \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、 f 値と震源距離およびサイトとの対応関係や各値の相互関係を概略的に捉えるために、 \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、 f 値の地理的な分布を示す。次に、 f 値と震源距離の対応関係および f 値とサイト特性の対応関係を調べることを目的として、2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて、震源距離が異なる観測点と震源距離が同程度の観測点における f 値を比較する。さらに、仙台平野周辺の K-NET 観測点の地震記録を用いて、 f 値とマグニチュードの関係について検討する。最後に、 f 値とサイト特性の対応に関して、堆積盆地構造の水平方向の広がり f 値に及ぼす影響について考察する。

2.2 f 値の定義

2.2.1 既往研究による f 値の定義

秋山・北村(2006)は、継続時間の長い地震動ではある単位地震動がくり返し発生していると仮定し、その単位地震動の反復数 f 値を次式で定義した。

$$f = \left(\frac{{}_0F(h)}{F(h)} \right)^2 = \left(\frac{{}_0\bar{S}_{V,h} / {}_0\bar{V}_{E,h=0.1}}{\bar{S}_{V,h} / \bar{V}_{E,h=0.1}} \right)^2 = \left(\frac{\bar{V}_{E,h=0.1} / \bar{S}_{V,h}}{{}_0\bar{V}_{E,h=0.1} / {}_0\bar{S}_{V,h}} \right)^2 \quad (2.1)$$

$$F(h) = \bar{S}_{V,h} / \bar{V}_{E,h=0.1} \quad (2.2)$$

$${}_0F(h) = {}_0\bar{S}_{V,h} / {}_0\bar{V}_{E,h=0.1} \quad (2.3)$$

ここに、 $F(h)$ は対象とする地震動に対する構造物の減衰関数、 $\bar{S}_{V,h}$ は任意の減衰定数 h のときの周期 0～10 秒における平均速度応答スペクトル、 $\bar{V}_{E,h=0.1}$ は 10%減衰の周期 0～10 秒における平均エネルギースペクトル、 ${}_0F(h)$ は単位地震動に対する構造物の減衰関数、 ${}_0\bar{S}_{V,h}$ は任意の減衰定数 h のときの単位地震動の \bar{S}_V 、 ${}_0\bar{V}_{E,h=0.1}$ は 10%減衰の単位地震動の \bar{V}_E である。ここで、平均速度応答スペクトル $\bar{S}_{V,h}$ と平均エネルギースペクトル $\bar{V}_{E,h=0.1}$ は次式で求める。

$$\bar{S}_{V,h} = \frac{\int_0^{T_m} S_{V,h}(T) dT}{T_m}, \quad \bar{V}_{E,h=0.1} = \frac{\int_0^{T_m} V_{E,h=0.1}(T) dT}{T_m} \quad (2.4)$$

(2.1)式より、 S_V に対して V_E の大きい地震動では f 値が大きくなることわかる。また、継続時間が長い地震動では他の地震動と比べて、同じ周期でも V_E （≡フーリエ振幅スペクトル）が大きくなるため、相対的に f 値が大きくなることが示されている。

減衰関数 $F(h)$ は弾性系のエネルギーの釣合式に基づき、等価くり返し数 n を用いて(2.5)式で書き換えられる。

$$F(h) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi h n}} \quad (2.5)$$

ここで、秋山・北村(2006)は El Centro 記録を単位地震動として、 $n=3$ のときの(2.5)式を単位地震動の減衰関数 ${}_0F(h)$ とし、(2.6)式で表している。

$${}_0F(h) = \frac{1}{\sqrt{1+12\pi h}} \quad (2.6)$$

ただし、 f 値は減衰定数 $h=0.1$ に対応する値をとるため、ここでは ${}_0F(h)=0.458$ とする。

表 2.2-1 の灰色部分に、周期 0.1～10 秒（以後、全周期成分と呼ぶ）の 5 つの地震記録における \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、 $F(h)$ および f 値を示す。秋山・北村(2006)で標準波とされている El Centro 記録と実効継続時間 t_0 が 50 秒の八戸記録では $f \approx 1$ となった一方、JMA KOBE では $f < 1$ 、HKD129(苫小牧)記録と TKY007(新宿)記録では $f > 1$ となり、各地震動の \bar{S}_V と \bar{V}_E の関係が f 値に現れている。

表 2.2-1 平均擬似速度応答スペクトル \bar{S}_V ，平均エネルギースペクトル \bar{V}_E ，減衰関数 $F(h)$ および f 値

	周期	$\bar{S}_V(h=0.1)$	$\bar{V}_E(h=0.1)$	$F(h=0.1)$	${}_0F(h=0.1)$	f 値
	(sec)	(cm/s)	(cm/s)			
Imperial Valley 地震(1940) El centro記録 (標準波)	0.1-10	27.25	60.60	0.450	0.458	1.04
	0.1-1	40.17	97.69	0.411		1.24
	1-2	42.23	96.72	0.437		1.10
	2-3	50.12	89.67	0.559		0.67
	3-10	20.04	46.09	0.435		1.11
十勝沖地震 (1968) 八戸記録 (標準波)	0.1-10	30.97	70.22	0.441		1.08
	0.1-1	31.89	76.72	0.416		1.21
	1-2	50.41	115.40	0.437		1.10
	2-3	63.27	133.51	0.474		0.93
	3-10	23.45	53.82	0.436		1.10
兵庫県南部 地震(1995) JMA KOBE	0.1-10	52.38	108.09	0.485		0.89
	0.1-1	114.50	231.59	0.494		0.86
	1-2	136.33	244.94	0.557		0.68
	2-3	80.57	133.73	0.603		0.58
	3-10	27.66	67.59	0.409		1.25
十勝沖地震 (2003) HKD129 (苫小牧)記録	0.1-10	40.76	109.25	0.373		1.51
	0.1-1	9.81	34.96	0.281		2.66
	1-2	23.46	74.02	0.317		2.09
	2-3	36.07	107.10	0.337		1.85
	3-10	48.24	124.99	0.386		1.41
東北地方 太平洋沖地震 (2011) TKY007 (新宿)記録	0.1-10	22.51	79.94	0.282		2.64
	0.1-1	16.94	70.74	0.239		3.66
	1-2	22.49	85.49	0.263		3.03
	2-3	25.20	91.32	0.276		2.75
	3-10	22.91	78.81	0.291		2.48

2.2.2 周期帯毎の $F(h)$ と f 値の評価

秋山・北村(2006)が提案した(2.6)式の単位地震動の減衰関数 ${}_0F(h)$ は、周期 0～10 秒の \bar{S}_V と \bar{V}_E の関係を対象としており、周期帯を分けた場合に同式を適用できるかはわからない。そこで、本節では、全周期成分を 0.1～1 秒、1～2 秒、2～3 秒、3～10 秒の 4 帯域に分割した場合の f 値を評価し、全周期成分の f 値と比較することで、 ${}_0F(h)$ の適用範囲を調べる。

表 2.2-1 に各周期帯の \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、 $F(h)$ および f 値を示す。 $F(h)$ は(2.2)式から周期帯毎に求め、 f 値は(2.1)式に各周期帯の $F(h)$ と ${}_0F(h)=0.458$ を代入して求めた。表 2.2-1 より、 f 値に着目すると、JMA KOBE や HKD129 記録では周期帯による差が大きく、短周期帯と長周期帯で異なる f 値を示している。一方、El Centro 記録と八戸記録は周期帯による差が小さく、全周期成分とほぼ同じ f 値となっていることがわかる。したがって、El Centro 記録と八戸記録に対しては、分割した周期帯においても ${}_0F(h)$ を適用できると考えられる。

以上の結果を踏まえ、本章では、すべての周期帯の f 値の評価に(2.6)式の ${}_0F(h)$ を採用することとする。

2.3 観測記録の周期帯毎のf値

2.3.1 検討対象地震と地震動

検討対象地震は、2011年東北地方太平洋沖地震、2003年十勝沖地震の本震（以後、本震と呼ぶ）および2003年十勝沖地震の最大余震（以後、余震と呼ぶ）の3地震とする。地震諸元を表2.3-1に示す。表2.3-2の条件を設定し、観測記録のうち、各周期帯のフーリエ振幅スペクトルにノイズを含まない記録を選定した。特に \bar{S}_v を指標とした理由は、振幅が小さくノイズが多く含まれるような記録では、 \bar{S}_v が極めて小さい値を示し、(2.1)式でf値を計算すると発散した値になることが事前検討で多かったためである。なお、観測記録には防災科学技術研究所のK-NETの地表記録を用いた。2011年東北地方太平洋沖地震に関しては、2011/3/11 14:46の記録と2011/3/11 14:51の記録を連結させて、最大600秒までを対象とした。

表 2.3-1 地震諸元

発生日時		深さ(km)	M_w	地震名
年/月/日	時：分			
2011/03/11	14:46	24	9.0	2011年東北地方太平洋沖地震
2003/09/26	4:50	42	8.0	2003年十勝沖地震
2003/09/26	6:08	21	7.1	同余震

表 2.3-2 観測記録の選定条件

地震名	①震源距離	②平均 S_v	③その他
2011年東北地方太平洋沖地震	700km以下	5cm/s以上	周期0.1-1秒，1-2秒： 全周期成分に対する 加速度累積パワーが5%以上 周期2-3秒，3-10秒： 全周期成分に対する 速度累積パワーが5%以上
2003年十勝沖地震	400km以下	5cm/s以上	
同余震	400km以下	2cm/s以上	

2.3.2 周期帯毎の分割波形と応答の主軸

短周期帯と長周期帯の地震動特性の違いを評価するため、周期帯を0.1～1秒、1～2秒、2～3秒、および3～10秒に4分割して観測加速度記録を分析する。図2.3-1に、後述する全周期成分の応答主軸方向の波形をもとにした2011年東北地方太平洋沖地震のTKY007記録の全周期成分および各周期帯の加速度波形を示す。なお、周期分割に際しては、対象周波数帯域外の周波数成分に係数0をかけ、矩形のバンドパスフィルターを施した。図2.3-1中の重心位置は、加速度絶対値の累積が50%を超える時間であり、波群の平均的な到来時間を示している。図2.3-1より、長周期になるにつれて重心位置が後退するとともに、波形の広がりが大きくなっていることがわかる。図2.3-2に擬似速度応答スペクトル($h=0.05$)を示す。図2.3-2より、4分割された波形のそれぞれが周期帯毎のスペクトルの山谷を捉えていることがわかる。この周期分割によって、長周期地震動の周期特性を評価することができ、長周期地震動の特徴がより明確になると考えられる。

建物応答の観点から安全側の評価となることを考え、本章では応答の主軸方向に対する評価を行う。具体的には、観測加速度波形のNS方向成分とEW方向成分を15°ピッチで合成した波形から、対象周期帯における $\bar{S}_V(h=0.05)$ が最大となる主軸方向を求め、その \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、 f 値を評価する。図2.3-3に、主軸方向の算定例として、2003年十勝沖地震のHKD129記録の応答の主軸を示す。図2.3-3より、周期帯毎に主軸方向が異なり、必ずしもEW方向やNS方向が最大とはならないことがわかる。全周期成分のEW方向、NS方向および主軸方向の加速度波形を図2.3-4に示す。図2.3-4より、3波形を比べると、NS方向の最大加速度PGAが大きい。図2.3-3の全周期成分ではNS方向の応答値は小さいことから、地動波形が最大となる方向と応答波形が最大となる方向が対応しているとは限らないことがわかる。

以上より、対象とする周期帯毎に応答の主軸方向の \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、および f 値を用いることで、建物応答の観点から代表的な評価ができると考えられる。

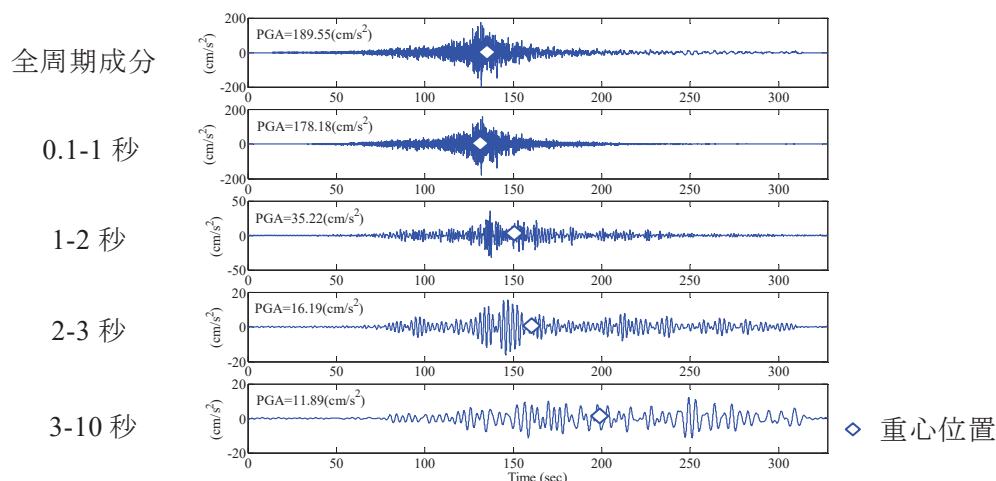


図 2.3-1 2011 年東北地方太平洋沖地震の TKY007（新宿）記録の
各周期帯の加速度波形

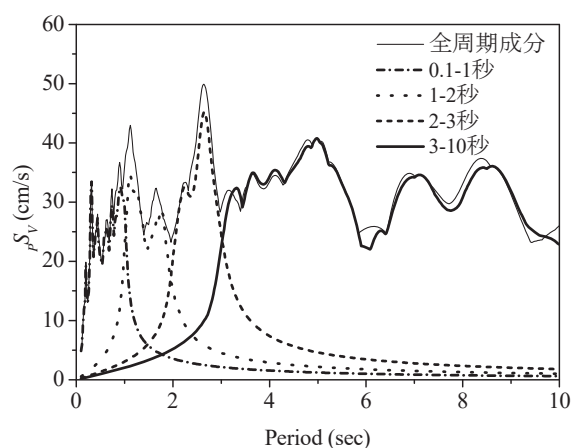


図 2.3-2 2011 年東北地方太平洋沖地震の TKY007（新宿）記録の
擬似速度応答スペクトル (h=0.05)

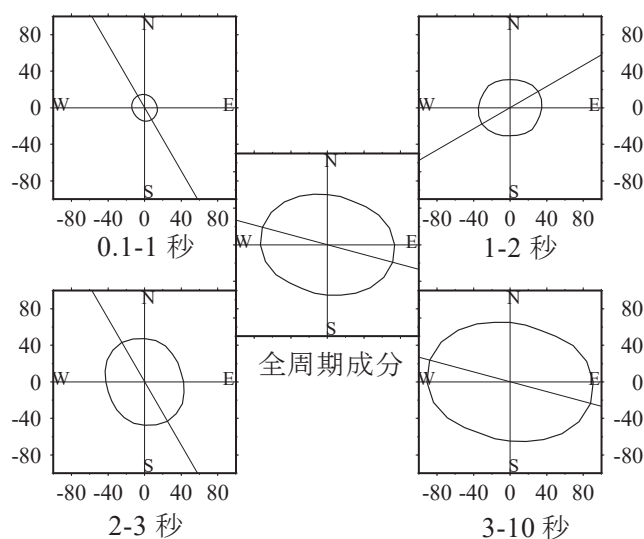


図 2.3-3 2003 年十勝沖地震の HKD129（苦小牧）記録の各周期帯の応答の主軸

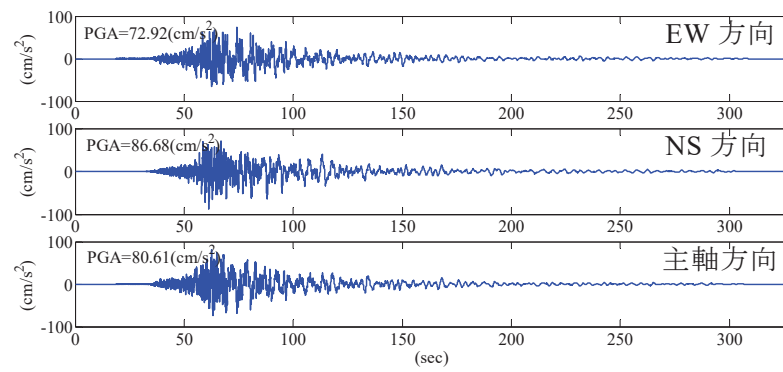


図 2.3-4 2003 年十勝沖地震の HKD129（苫小牧）記録の
EW 方向・NS 方向・主軸方向の全周期成分加速度波形

2.3.3 \bar{S}_V と \bar{V}_E および f 値の概観

震源距離やサイトによる \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、および f 値の違いを調べることで、また、 \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、および f 値のそれぞれの対応関係を捉えることを目的として、 \bar{S}_V 、 \bar{V}_E 、および f 値の地理的分布を分析する。

はじめに、 \bar{S}_V と \bar{V}_E の分布を確認する。図 2.3-5～図 2.3-7 の(a)と(b)より、いずれの周期帯でも \bar{S}_V と \bar{V}_E の分布が類似していることがわかる。ここで、周期 0.1～1 秒と 1～2 秒では震源距離に応じて \bar{S}_V と \bar{V}_E の値が小さくなる傾向があり、距離減衰の傾向が確認できる。周期 2～3 秒と 3～10 秒では、サイト毎に \bar{S}_V あるいは \bar{V}_E の差が顕著に現れている。図 2.3-5 の(a)と(b)では八戸台地、三本木原台地、仙台平野、新潟平野、および関東平野、また、図 2.3-6 の(a)と(b)、図 2.3-7 の(a)と(b)では石狩平野、勇払平野、および根釧台地で周辺に比べて \bar{S}_V と \bar{V}_E が大きくなっており、堆積盆地周辺での増幅が読み取れる。

次に、f 値の分布を確認する。周期 0.1～1 秒と 1～2 秒では、同程度の震源距離であっても、震源からの方位によって f 値に大きな差が生じている。図 2.3-5(c)では震源の南側よりも北側のほうが大きく、図 2.3-7(c)では震源の西側よりも東側が大きい。ただし、図 2.3-6(c)に示す本震ではそのような現象は見られない。これは、本震の震源断層における主要な破壊の進行方向が北東方向と推定され、陸地から遠ざかる方向であったため、破壊伝播効果の影響がどの観測点でも同程度であったことが原因の一つと考えられる。また、図 2.3-5～図 2.3-7 の(c)に示した震源距離 200 km と 400 km の円内の観測点を比べると、部分的ではあるが、震源に近いところで f 値が小さく、遠いところで大きくなっており、f 値が震源距離に依存する可能性を示唆している。一方、周期 2～3 秒と 3～10 秒では明瞭な方位依存性はみられない。また、余震を除いて、周期 3～10 秒では震源距離の影響もほとんど読み取れない。それらに代わって、図 2.3-5(c)では三本木原台地や関東平野、図 2.3-6(c)と図 2.3-7(c)では根釧台地などで f 値が相対的に大きくなっており、サイトの地盤特性の影響が f 値に反映されている。ここで、例えば図 2.3-5 において、関東平野のサイトでは $\bar{S}_V \cdot \bar{V}_E$ と f 値で共通して値が大きいものの、仙台平野では $\bar{S}_V \cdot \bar{V}_E$ は大きい f 値が小さくなっており、サイトにおける $\bar{S}_V \cdot \bar{V}_E$ と f 値の大小が必ずしも一致していないが、この解釈については後で述べる。

以上より得られた知見について、その原因を考察する。

(1) 短周期成分（周期 0.1～2 秒）での f 値の方位依存性

実体波が主体となる短周期成分では、震源断層の破壊が近づく方向で短く鋭い波形となり、建物応答に影響を及ぼす要因の中でも地震動の最大振幅が支配的となると考えられる。そのため、地震動の最大振幅が建物の最大応答値 $S_V(h=0.05)$ に概ね対応すると考えれば、他の地点における平均的な S_V と V_E の関係に比べて、 V_E よりも S_V が優位となると推察される。破壊が遠ざかる方向では、長く鈍い波形となり、最大振幅よりも波形の累積パワーが支配的となると考えられることから、他の地点における平均的な S_V と V_E の関係に比べて、 S_V に対して V_E が優位となると推測できる。したがって、 S_V と V_E の比である f 値にその方向性が現れたもの

と考えられる。

(2) f値の震源距離依存の可能性

地動加速度パワーの累積値が5～95%となる時間を表す実効継続時間 t_0 とf値には正の相関があることが示されている。また、地震動の継続時間は、周期2秒以下で震源距離と正の相関があることが指摘されている。短周期成分でf値が震源距離に比例するという本検討結果は、これらの既往研究の成果を支持するものと言える。

(3) 長周期成分（周期2～10秒）でのf値のサイト特性

長周期成分では、厚い堆積盆地構造での増幅に伴う継続時間の伸長がf値の大小に起因していると考えられる。単純化して考察するために、 S_V = 応答振幅、 V_E = 応答振幅×地震力×継続時間（繰り返し数）※と言い換えると、入力地震動の振幅の大小による影響は S_V と V_E で同等と推測されるが、継続時間の影響は V_E のみが受ける。そのため、相対的に継続時間が長くなる傾向がある堆積盆地周辺の観測点でf値が大きくなったと考えられる。

以上のように、f値を用いることによって、 S_V と V_E のそれぞれからではわからない地震動特性、特に継続時間に関する周期特性が明らかになる。

※) V_E = 応答振幅×地震力×継続時間（繰り返し数）の補足

1 質点振動系の運動方程式を考える。1 質点振動系の地震動入力時の力の釣合式は(2.7)式で表現される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{z} \quad (2.7)$$

ここに、 m は質点の質量、 \ddot{x} は質点の地面に対する相対加速度、 c は減衰係数、 \dot{x} は質点の地面に対する相対速度、 k は剛性率、 x は質点の地面に対する相対変位、 \ddot{z} は地動加速度である。(2.7)式に相対変位を乗じ、それを積分することで、(2.8)式のエネルギーの釣合式を得る。

$$E = m \int_0^x \ddot{x} dx + c \int_0^x \dot{x} dx + k \int_0^x x dx = -m \int_0^x \ddot{z} dx \quad (2.8)$$

さらに、(2.8)式の dx を $\dot{x}dt$ に置き換えると(2.9)式になる。

$$E = m \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt + c \int_0^t \dot{x} \dot{x} dt + k \int_0^t x \dot{x} dt = -m \int_0^t \ddot{z} \dot{x} dt \quad (2.9)$$

(2.9)式の右辺は次のように分解できる。

$$E = m \int_0^t \ddot{z} \dot{x} dt$$

地震力
応答振幅
継続時間
(質量 m の剛体に
(繰返し数)
作用する慣性力)

エネルギースペクトル V_E は(2.10)式で表される。

$$E = \frac{1}{2} m V_E^2, \quad V_E = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (2.10)$$

エネルギースペクトル V_E は入力エネルギー E の速度換算値であるので、上に示した地震動の入力エネルギーにおける地震力・応答振幅・継続時間の関係が成り立つ。

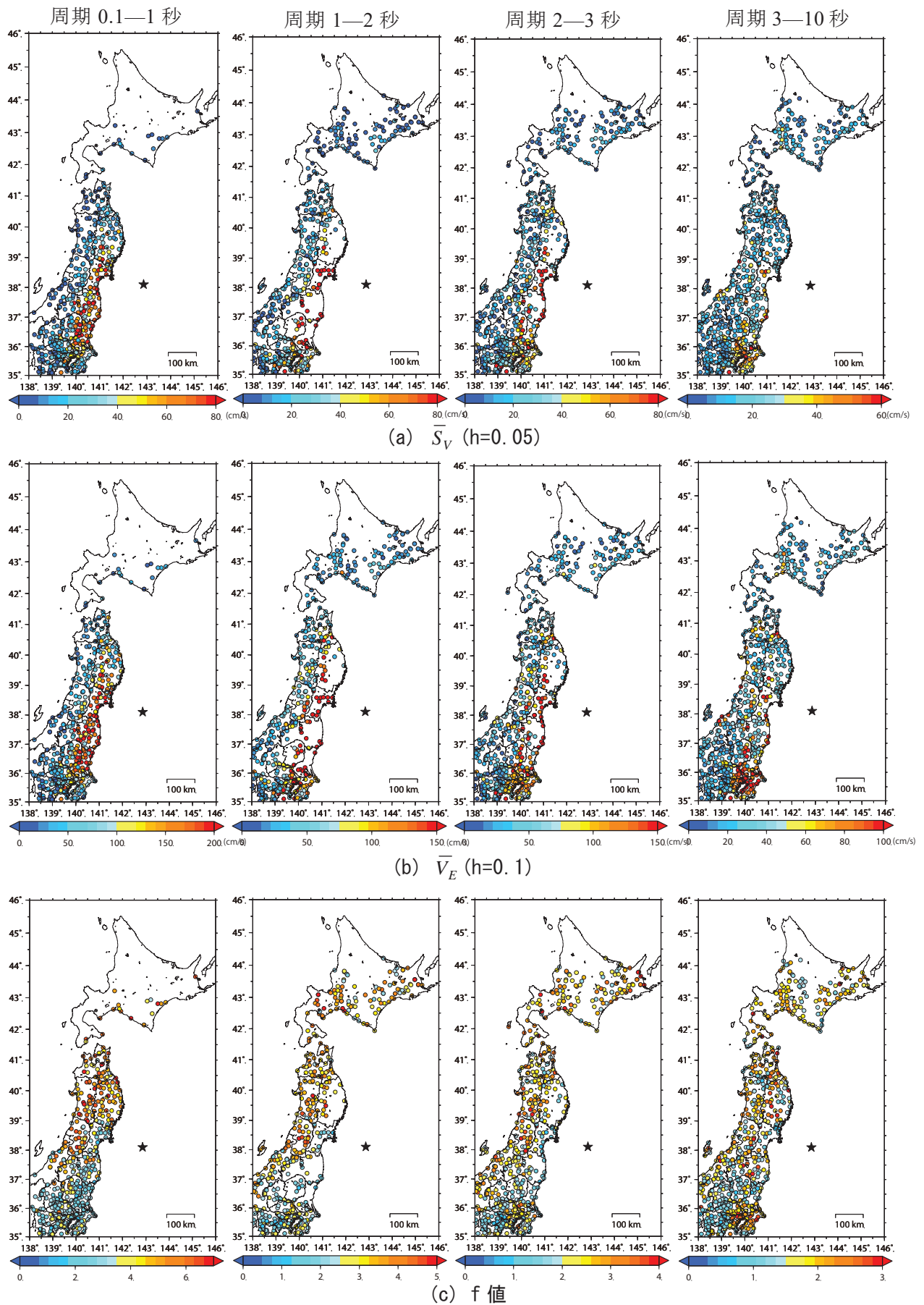


図 2.3-5 2011 年東北地方太平洋沖地震

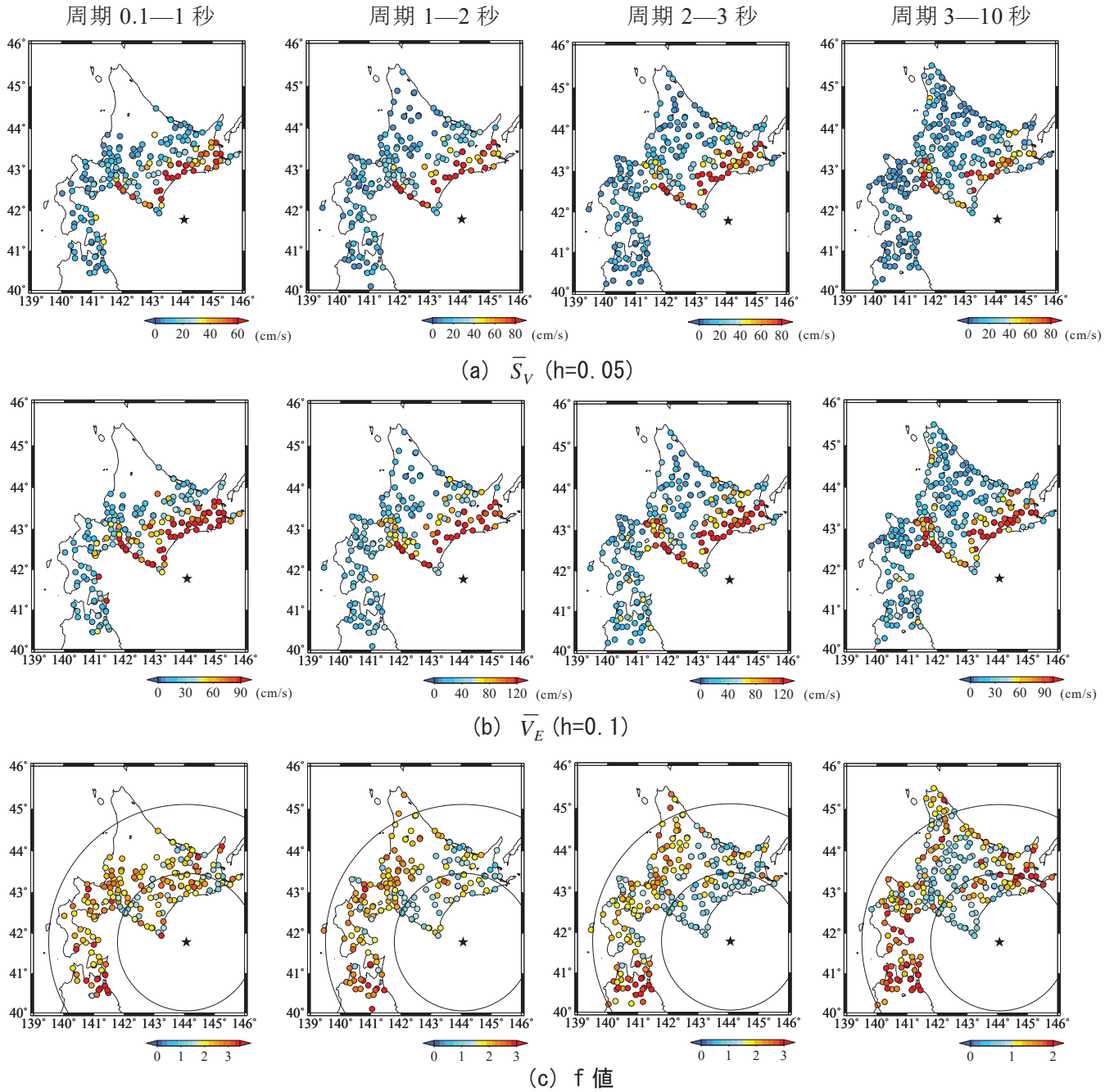


図 2.3-6 2003 年十勝沖地震本震

(※) 黒星印が震源(破壊開始点), 図中の円は内側から半径 200km, 400km の同心円を示す。

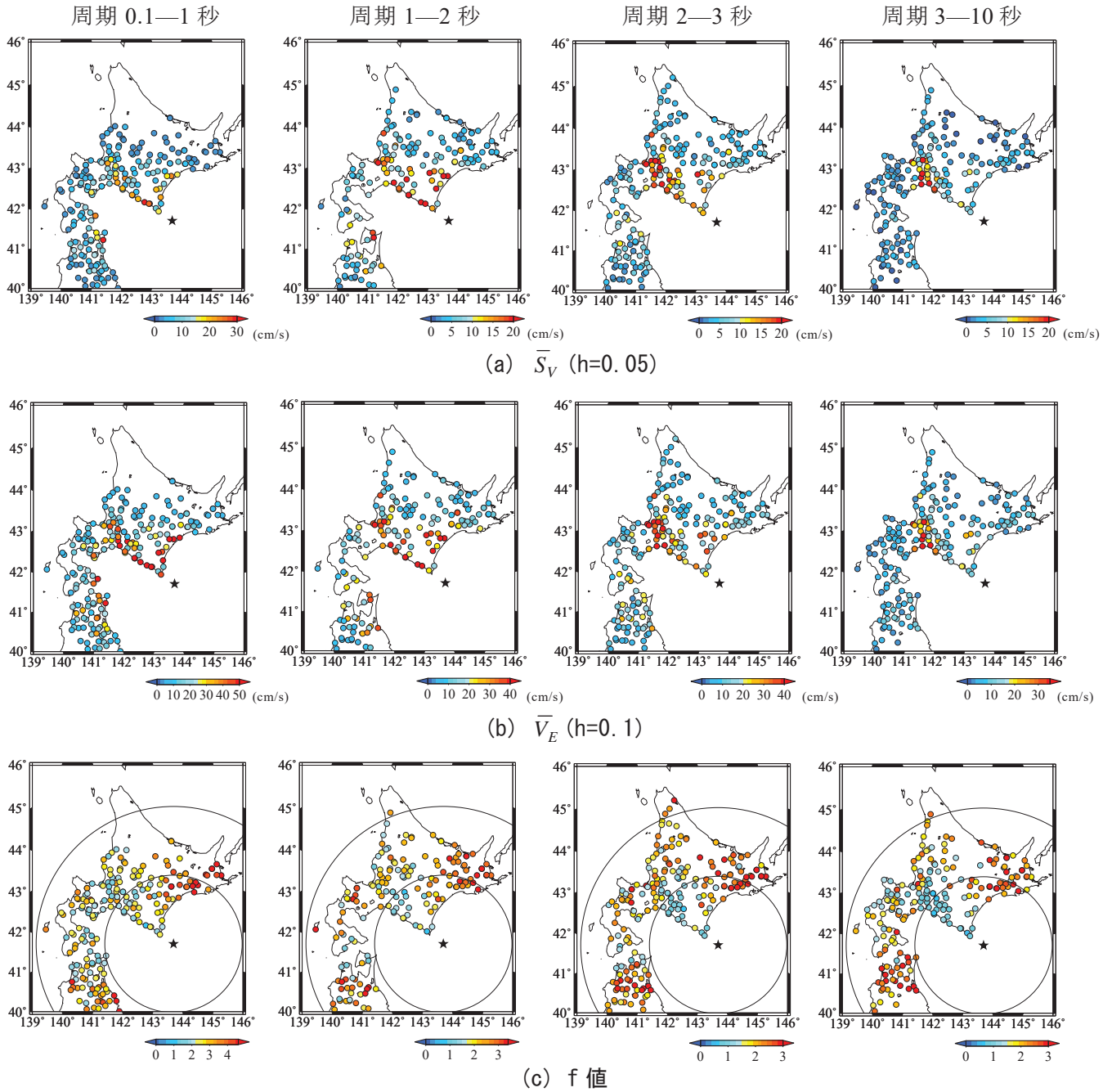


図 2.3-7 2003 年十勝沖地震最大余震

(※) 黒星印が震源(破壊開始点), 図中の円は内側から半径 200km, 400km の同心円を示す。

2.4 震源・伝播経路・サイト特性とf値の関係

2.4.1 震源距離とf値の関係

2.4.1.1 震源距離とf値の関係の傾向

2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて、震源距離による f 値の違いを視覚的に示す。震源距離による f 値の違いの検討に用いる観測点を図2.4-1に示す。様々な震源距離をもつ観測点を含むように、震源距離150~400 kmの範囲を対象とした。

図2.4-1に示した震源距離が異なる観測点の \bar{s}_V 、 \bar{v}_E 、および f 値を比較する。図2.4-2に、北部の観測点から順に、全周期成分の応答の主軸方向の波形にバンドパスフィルターを施した周期0.1~1秒と1~2秒の加速度波形および周期2~3秒と3~10秒の速度波形を各観測点の \bar{s}_V 、 \bar{v}_E 、 f 値とともに示す。

なお、周期0.1~1秒と周期1~2秒、周期2~3秒と周期3~10秒はそれぞれ概ね同様の傾向を示していたため、それぞれを代表して周期0.1~1秒と周期3~10秒について以降で考察する。

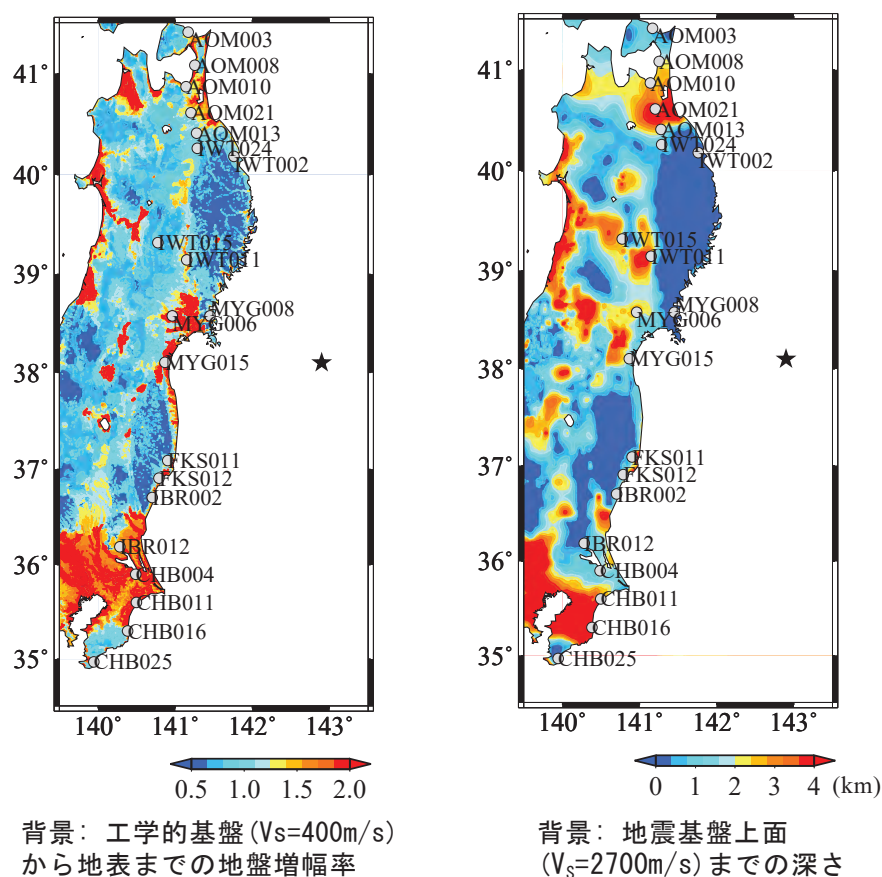


図 2.4-1 震源距離が異なる観測点

(a) 周期 0.1～1 秒

図 2.4-2(a)より、震源距離が最短である MYG008 を基準に南北の観測点をそれぞれ見ると、震源距離に応じて \bar{s}_v と \bar{v}_E が減衰し、 f 値が大きくなる傾向がみられる。ここで、MYG008 の \bar{s}_v と \bar{v}_E が最大となっていないのは、図 2.4-1 のコンターからもわかるように、MYG008 が近隣の MYG006 や MYG015 などの観測点よりも地盤増幅率が小さく、かつ地震基盤上面までの深さが浅い硬質な地盤であるためと考えられる。FKS012 以南で大幅に f 値が低減されているが、これは宮城県沖の断層破壊によって誘発された福島県沖の断層破壊が FKS012 付近から支配的となり、地震動の振幅が再度増大したことに伴い、 \bar{s}_v が大きくなったことが原因と推察される。また、破壊開始点から南北それぞれの方向で、 f 値のレベルに差がみられ、北側で大きく南側で小さくなっており、震源断層、特に強震動生成域と観測点との幾何学的な位置関係に起因する短周期成分の方位依存性が確認できる。

(b) 周期 3～10 秒

図 2.4-2(d)より、AOM021 や CHB011 など、地盤増幅率が大きく、かつ地震基盤上面までの深さが深いサイトで \bar{s}_v と \bar{v}_E の増幅がみられ、周期 0.1～1 秒と比べて \bar{s}_v と \bar{v}_E の震源距離依存の傾向が弱まっていることが分かる。また、震源距離が異なっても同程度の f 値をもつ観測点があり、 f 値の震源距離依存の傾向が弱いことを示している。

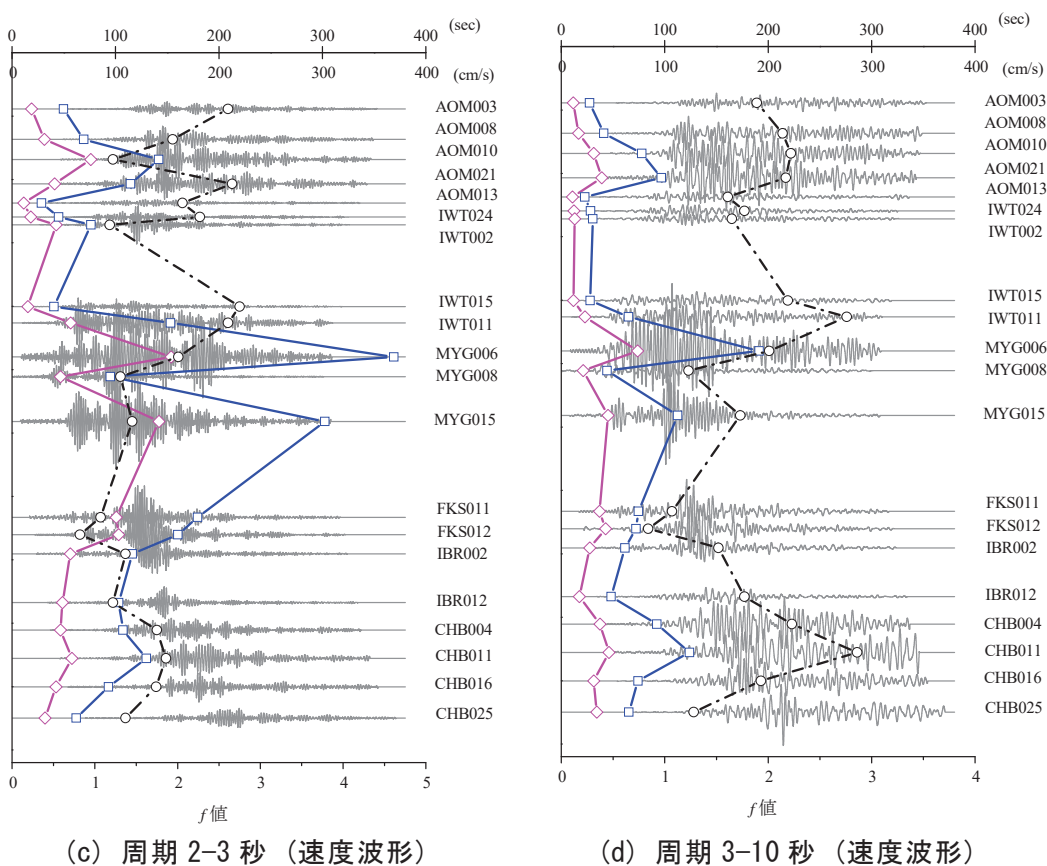
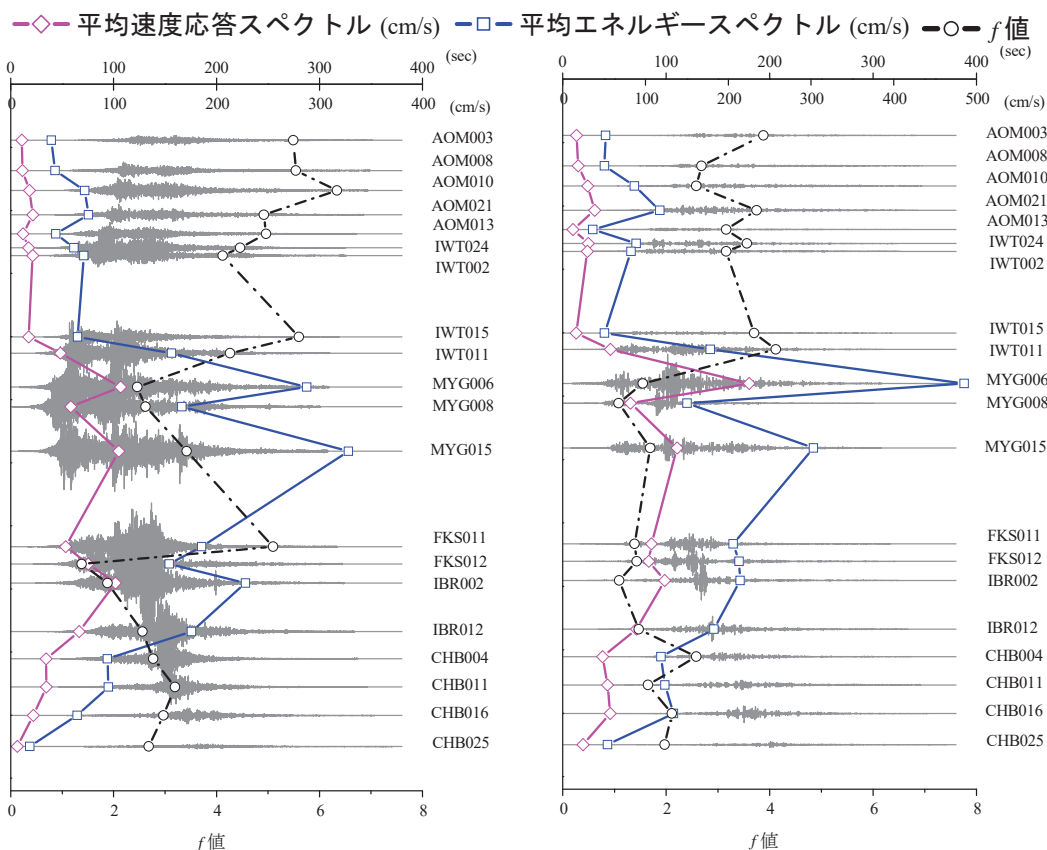


図 2.4-2 震源距離が異なる観測点の時刻歴波形

2.4.1.2 震源距離と f 値の関係の定性的評価

震源距離と f 値の関係について評価する。図 2.4-3 に各周期帯の震源距離と f 値の関係および最小二乗法により求めた 3 地震の全観測記録の近似直線を示す。図 2.4-3 より、周期 0.1～1 秒では大きくばらついているが、周期 1 秒以上の帯域では徐々に f 値の値域が狭まるとともに、ばらつきが収まってきていることが分かる。また、長周期ほど近似線の傾きが小さくなり、周期 3～10 秒ではほぼフラットになっている。表 2.4-1 に各地震の震源距離と f 値の相関係数を示す。表 2.4-1 より、周期 0.1～1 秒と 1～2 秒は、2011 年東北地方太平洋沖地震と 2003 年十勝沖地震の最大余震で正の相関がほとんど認められない一方で、2003 年十勝沖地震の本震ではある程度の相関があることがわかる。2011 年東北地方太平洋沖地震と 2003 年十勝沖地震の最大余震は、強震動生成域と観測点との幾何学的な位置関係に起因する f 値の方位依存性が支配的であったため、それによるばらつきの影響で相関係数が小さくなったと推察される。2003 年十勝沖地震本震は、方位依存性がほとんど確認されなかったこと、そして、短周期帯において f 値はサイト特性の影響を受けにくいこと（後述）を踏まえると、震源距離の影響を多く含んでいると推察される。また、周期 2～3 秒と 3～10 秒では、2011 年東北地方太平洋沖地震ではほぼ相関がなく、2003 年十勝沖地震の本震と余震で低い正の相関があるという結果となった。2003 年十勝沖地震の本震と余震では、 f 値が相対的に大きい値を示していた石狩平野、勇払平野、根釧台地などの堆積層が発達した領域が震源から比較的離れた場所に位置しており、サイト特性の影響によって震源距離と f 値の相関が高まった可能性がある。

ここで、より詳細な評価のために、2011 年東北地方太平洋沖地震と 2003 年十勝沖地震本震について、個々の観測記録の応答スペクトルとエネルギースペクトルのそれぞれからサイト特性を除去し、 f 値を再評価した。応答スペクトルとエネルギースペクトルのサイト特性は、建築研究所(2010)からデータ公開された佐藤・他(2010)によるサイト係数を用いた。データがない一部の観測点については検討対象外とした。2011 年東北地方太平洋沖地震における震源距離とサイト特性を取り除いた f 値の関係を図 2.4-4 に示す。ここで、強震動生成域と観測点との幾何学的な位置関係に起因する方位依存性による f 値の差が無視できなかったため、図 2.3-5(c)の f 値の地理的分布を参考に、北緯 38.5 度から南側の観測点を“震源断層と観測点との幾何学的な位置関係の影響を受けやすかった観測点”（forward 側）、北側の観測点を“震源断層と観測点との幾何学的な位置関係の影響を受けにくかった観測点”（backward 側）に分類した。2003 年十勝沖地震本震における震源距離とサイト特性を取り除いた f 値の関係を図 2.4-5 に示す。震源距離とサイト特性を除去した f 値の相関係数を表 2.4-2 に示す。表 2.4-2 より、周期 0.1～1 秒と 1～2 秒は、2011 年東北地方太平洋沖地震の backward 側と 2003 年十勝沖地震本震で相関が強い一方、2011 年東北地方太平洋沖地震の forward 側ではほぼ無相関である。forward 側では、観測点と複数ある強震動生成域のそれぞれとの幾何学的な位置関係によって地震動の経時特性が大きく異なり、波群が明瞭に分かれている

波形や一体となっている波形など多様であったため、他とは異なる結果が得られたと推察される。周期 2～3 秒と 3～10 秒は、2011 年東北地方太平洋沖地震の forward 側と 2003 年十勝沖地震本震ではほぼ無相関である。2011 年東北地方太平洋沖地震の backward 側で低い正の相関があるが、周期 0.1～1 秒と 1～2 秒よりも小さくなっている。

以上より、震源距離とf値は、短周期帯 0.1～2 秒で正の相関を持ち、長周期帯 2～10 秒では短周期帯よりも相関が弱まる傾向があることを確認した。

なお、図 2.4-3 の本震($M_w 8.0$)・余震($M_w 7.1$)と 2011 年東北地方太平洋沖地震($M_w 9.0$)を比べると、特に短周期帯において 2011 年東北地方太平洋沖地震のほうがf値の値域が広く、マグニチュードによる影響が現れているように見える。詳細は次節で述べることとする。

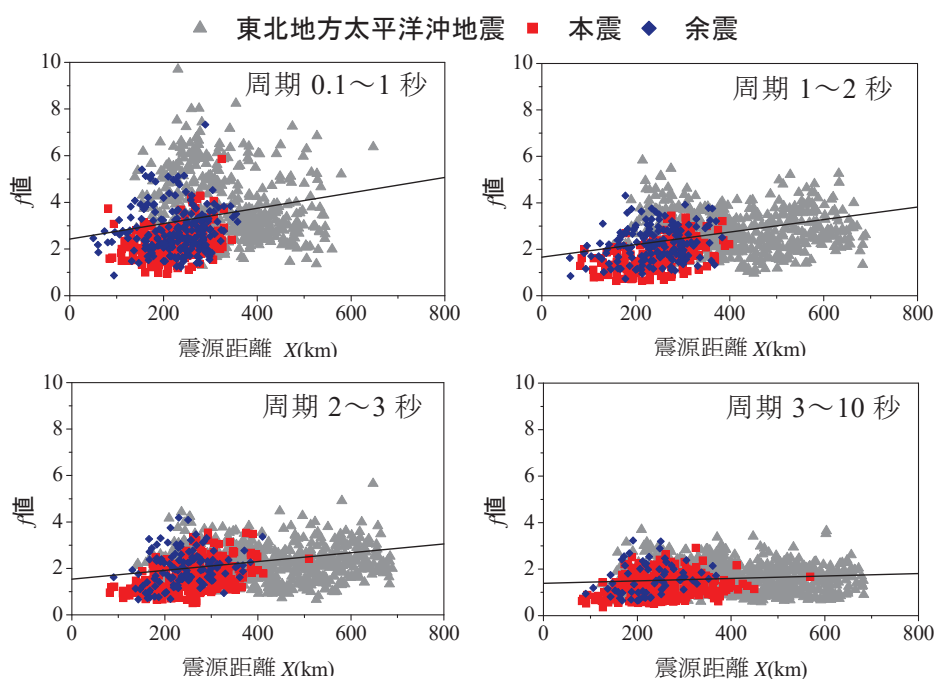


図 2.4-3 震源距離とf値の関係

表 2.4-1 震源距離とf値の相関係数

	周期 (秒)			
	0.1-1	1-2	2-3	3-10
2011年 東北地方太平洋沖地震	-0.196	-0.044	0.064	-0.119
2003年 十勝沖地震本震	<u>0.339</u>	<u>0.505</u>	0.478	0.204
2003年 十勝沖地震余震	0.050	0.221	0.238	0.246

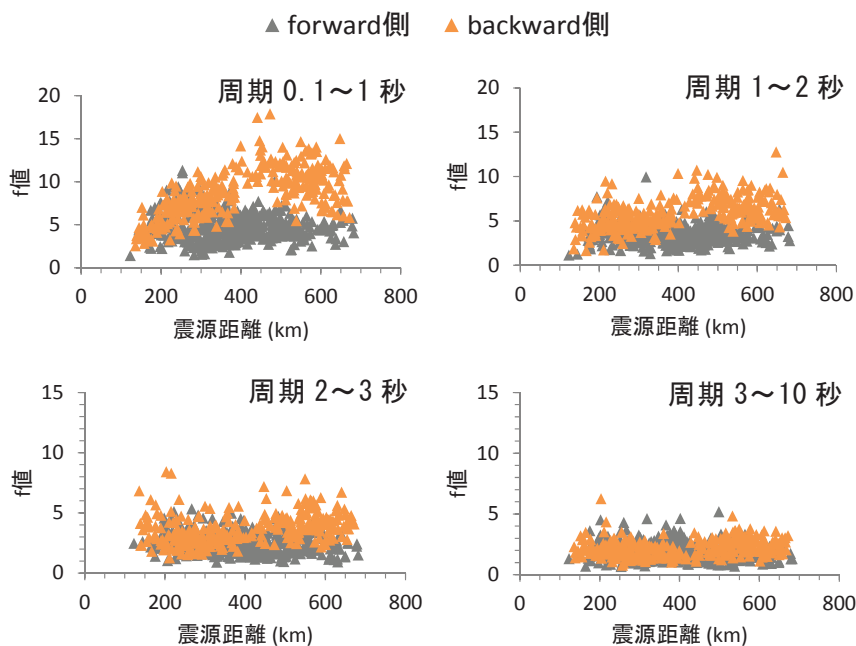


図 2.4-4 2011 年東北地方太平洋沖地震における震源距離とサイト特性を取り除いた f 値の関係

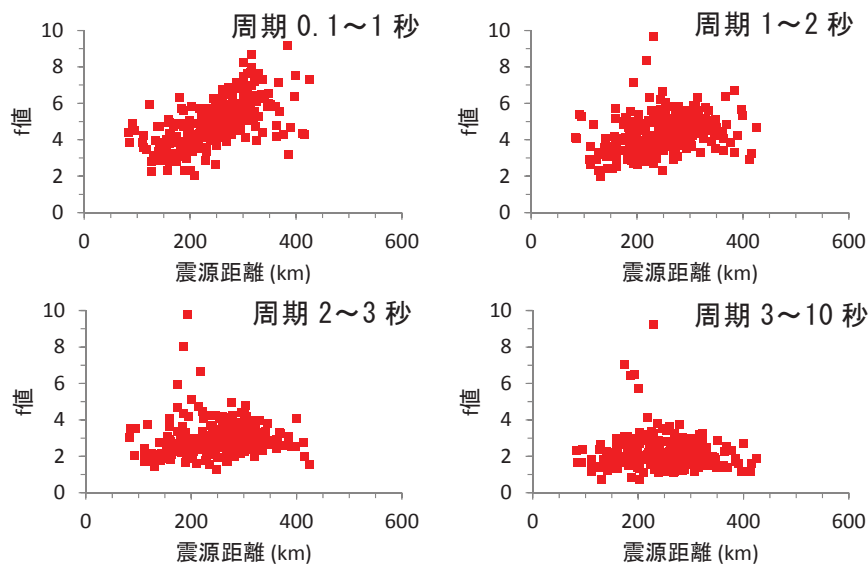


図 2.4-5 2003 年十勝沖地震本震における震源距離とサイト特性を取り除いた f 値の関係

表 2.4-2 震源距離とサイト特性を取り除いた f 値の相関係数

		周期(秒)			
		0.1-1	1-2	2-3	3-10
2011年 東北地方太平洋沖地震	震源断層との幾何学的な位置関係の影響を受けやすかった方向の観測点 (forward側)	-0.047	-0.036	-0.171	-0.145
	震源断層との幾何学的な位置関係の影響を受けにくかった方向の観測点 (backward側)	0.628	0.499	0.342	0.227
2003年 十勝沖地震本震		0.601	0.307	0.066	-0.098

2.4.2 マグニチュードと f 値の関係

モーメントマグニチュード M_w と f 値の関係について評価する。対象とする地震は、いずれも同様の震源メカニズム（逆断層型、プレート境界地震）であり、様々なマグニチュードを有する 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震を中心に M_w 5～7 の地震を選んだ。なお、震源断層の面的な効果の影響を無視できるようにするために、上限を M_w 7 とした。対象とする観測点は、震源距離が同程度とみなせるようにするために、仙台平野および山形盆地周辺の K-NET 観測点のうち、震源距離が 150～200 km となる観測点とした。表 2.4-3 に地震諸元、図 2.4-6 に震央分布と観測点を示す。観測記録は、加速度時刻歴波形が途切れておらず、周期 0.1～10 秒のフーリエ振幅スペクトルにノイズが含まれないものを選定した。また、サイト特性を無視できるようにするために、個々の観測記録の応答スペクトルとエネルギースペクトルのそれぞれからサイト特性を除去した後に f 値を求めた。応答スペクトルとエネルギースペクトルのサイト特性は、建築研究所(2010)からデータ公開された佐藤・他(2010)によるサイト係数を用いた。

M_w とサイト特性を取り除いた f 値の関係を図 2.4-7 に示す。 M_w と f 値の相関係数を表 2.4-4 に示す。表 2.4-4 は、周期 0.1～1 秒ではやや低い正の相関が認められるが、周期 1 秒以上になるとその傾向は弱まり、周期 3～10 秒ではやや低い負の相関があることを示している。物理的には、規模が大きくなるほど震源の破壊継続時間が長くなり、観測される地震動の継続時間も長くなるため、特に長周期帯の波数が増えることに伴って f 値は増大すると考えられる。しかし、本検討ではそれと反する結果となった。本検討では、特定の領域の地震、特定の観測点を対象とした。また、震源距離やサイト特性の影響をできるだけ無視できるようにデータを処理したが、除去しきれなかった偶然的なばらつきも含まれている。今後、さらなるデータの蓄積を待って対象地震を増やし、両者の関係性の評価を更新していく必要があると考える。

なお、震源位置に基づき、対象地震を南北に分類し、震源から観測点までの伝播経路の違いが評価結果に影響するかどうか検討したが、明瞭な違いは確認できなかった。

表 2.4-3 地震諸元

記号	発生日時		震源位置*1		深さ(km)*1	Mw*2
	年/月/日	時:分	経度	緯度		
EQ01	2001/02/25	06:54	142.2567	37.1937	24.0	5.7
EQ02	2002/07/24	05:05	142.3193	37.2292	30.0	5.5
EQ03	2003/10/31	10:06	142.6995	37.8292	33.4	6.7
EQ04	2004/05/29	12:47	142.0235	37.6615	37.8	5.7
EQ05	2005/12/02	22:13	142.3535	38.0727	40.3	6.5
EQ06	2006/01/18	23:25	142.2000	37.7997	35.9	5.5
EQ07	2008/07/19	11:39	142.2645	37.5208	31.6	6.9
EQ08	2008/07/21	20:30	142.3412	37.1365	27.4	5.8
EQ09	2008/12/04	08:17	143.2172	38.5267	24.1	5.8
EQ10	2010/03/14	17:08	141.8180	37.7242	39.8	6.5
EQ11	2010/07/05	06:56	142.6528	39.6572	34.5	6.3
EQ12	2011/03/10	03:16	142.8788	38.2712	28.9	6.0
EQ13	2011/03/10	06:24	143.0448	38.1722	9.3	6.5
EQ14	2011/03/11	20:37	142.6192	39.1697	24.0	6.6
EQ15	2011/03/12	22:15	141.4263	37.1975	40.1	6.2
EQ16	2011/03/12	23:43	142.6955	39.4703	9.3	5.7
EQ17	2011/03/13	08:25	141.9483	38.0120	15.2	5.8
EQ18	2011/03/19	08:33	142.4210	39.1853	36.7	5.5
EQ19	2011/03/24	17:21	142.3577	39.0767	33.7	5.9
EQ20	2011/03/25	20:36	142.1072	38.7292	44.7	6.2
EQ21	2011/03/31	16:15	142.0843	38.8723	47.4	6.0
EQ22	2011/04/01	20:58	142.1662	39.3363	45.2	5.9
EQ23	2011/04/28	18:28	141.7815	37.4133	43.5	5.6
EQ24	2011/06/23	06:51	142.5908	39.9478	36.4	6.7
EQ25	2015/02/17	08:06	143.1927	39.8723	12.7	6.7

*1) 気象庁 *2)F-net

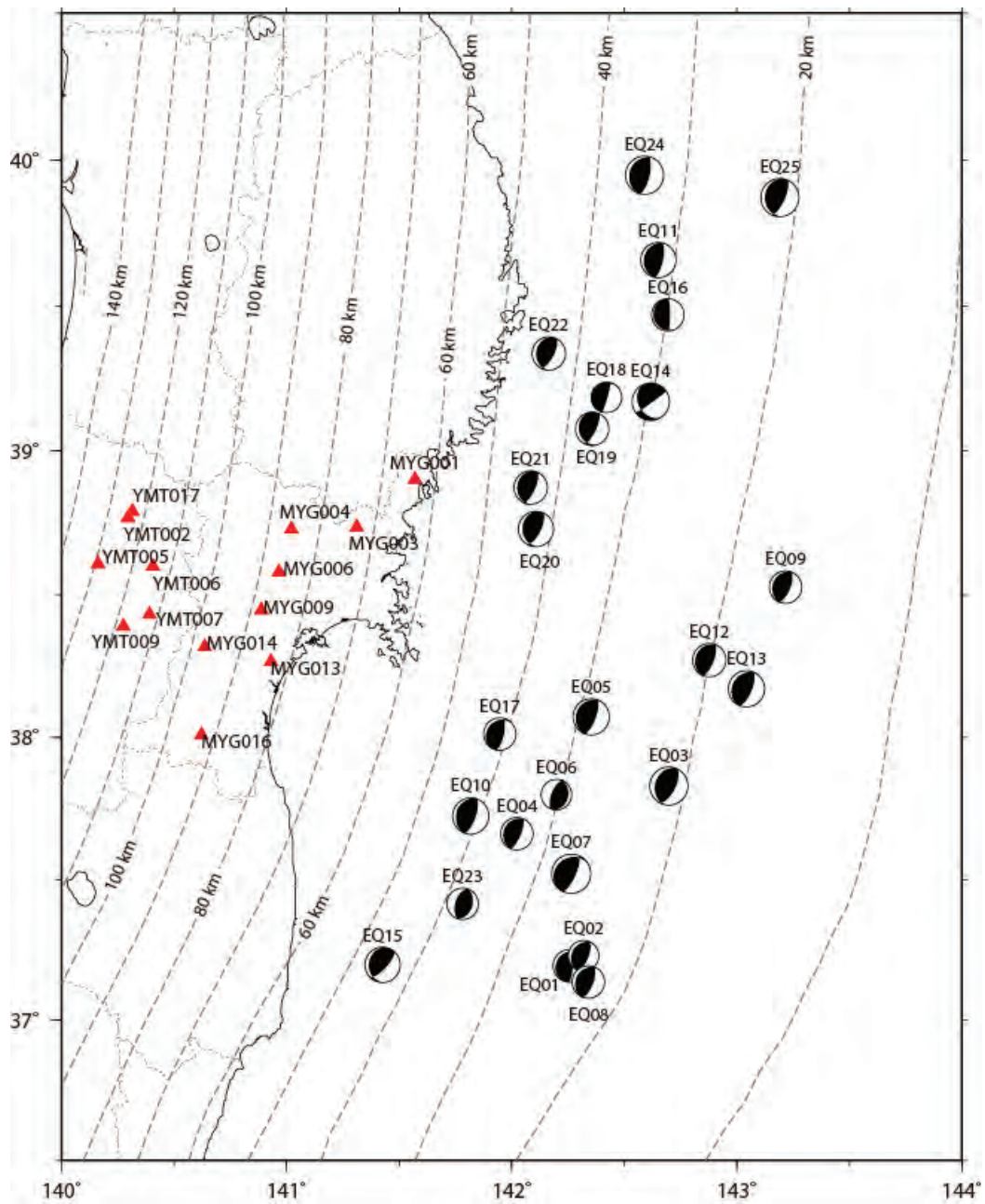


図 2.4-6 震央分布と観測点

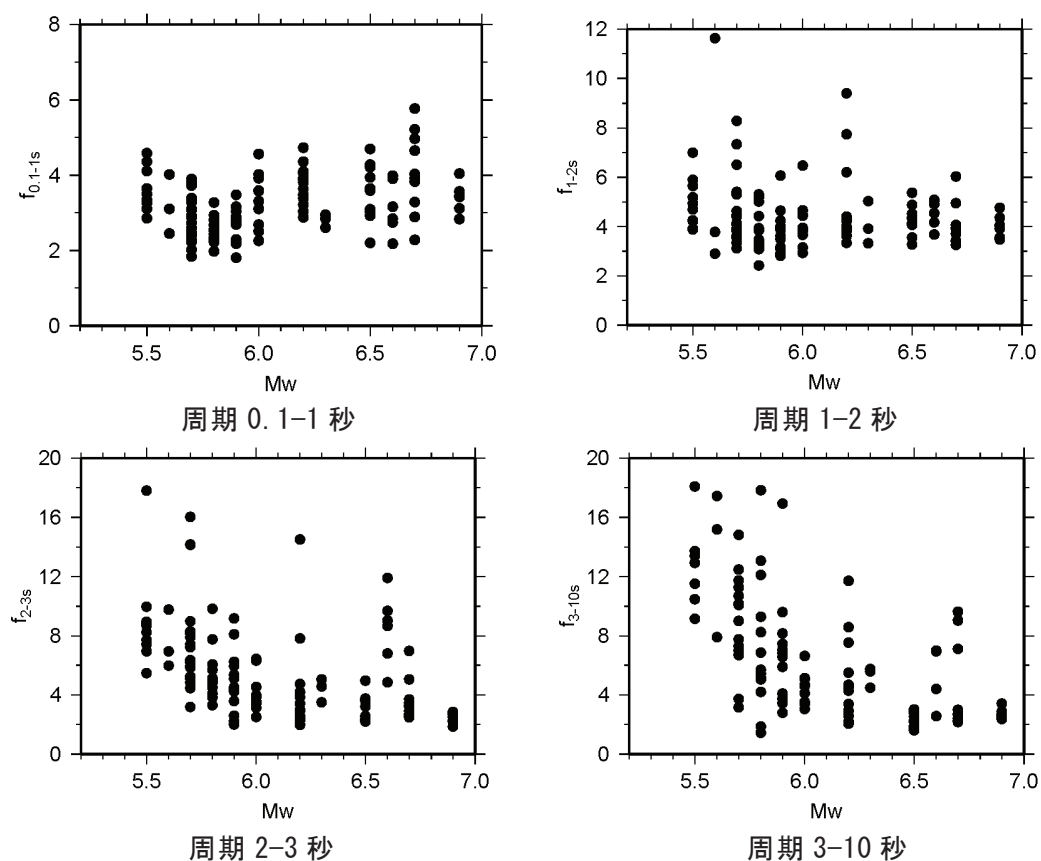


図 2.4-7 M_w と f 値

表 2.4-4 M_w と f 値の相関係数

	0.1-1s	1-2s	2-3s	3-10s
2011年東北地方太平洋沖地震の 余震等の仙台平野～山形盆地周 辺の観測点における記録	0.323	-0.103	-0.450	-0.594

2.4.3 サイト特性とf値の関係

2.4.3.1 サイト特性とf値の関係の傾向

2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて、サイトによるf値の違いを視覚的に示す。図2.4-8に、サイトによるf値の違いを検討するための観測点を示す。震源距離の影響を排除し、サイト特性の影響のみを比較できるようにするため、震源距離250 km前後の概ね等震源距離とみなせる観測点を選んだ。図の背景には、観測点の地盤特性の影響を評価するため、表層30 mの平均S波速度(AVS30)から算出された工学的基盤($V_s=400\text{m/s}$ 相当層)から地表までの最大速度の増幅率と地震基盤上面($V_s=2700\text{m/s}$ 相当層)までの深さをコンターで表した。なお、図中の★は破壊開始点、円は半径100～400 kmまで100 km刻みの同心円を示す。

震源距離が同程度の観測点の \bar{s}_v 、 \bar{v}_E 、およびf値を比較する。周期0.1～1秒と1～2秒の加速度波形および周期2～3秒と3～10秒の速度波形を表層地盤の増幅率が小さい順に並べたものを、各観測点の \bar{s}_v 、 \bar{v}_E 、f値とともに図2.4-9に示す。また、深部地盤との関係もみるために、地震基盤上面までの深さが浅い順に並べ換えた周期3～10秒の速度波形を図2.4-10に示す。波形は全周期成分の応答の主軸方向の波形に各周期帯のバンドパスフィルターを施したものである。代表して周期0.1～1秒、3～10秒に関して考察する。

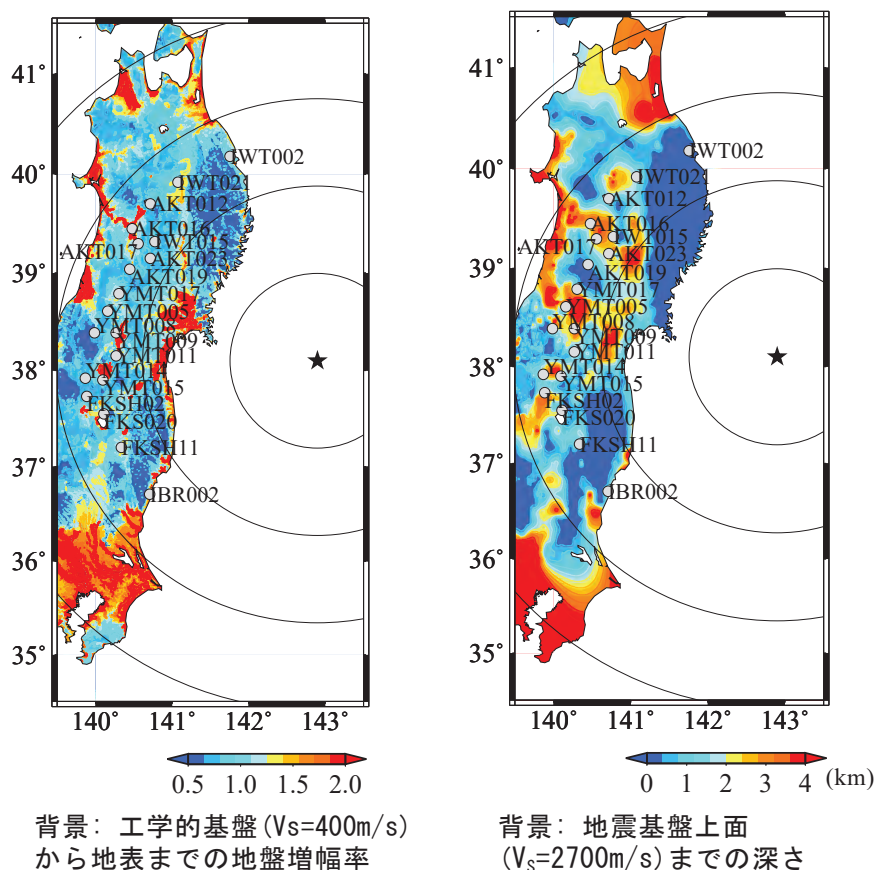


図 2.4-8 震源距離が同程度の観測点

(a) 周期 0.1～1 秒

図 2.4-9(a)より、周期 0.1～1 秒の f 値は 2～6 程度であり、ばらつきが大きい。IBR002 が最も小さく、ついで FKSH11、FKS020 が小さくなっており、陸寄りの福島県沖の強震動生成域（佐藤，2012）と観測点との幾何学的な位置関係に起因する方位依存性が、 f 値のばらつきに寄与している可能性が考えられる。それら 3 地点を除いても、地盤増幅率が小さい YMT014、地盤増幅率が中間程度の AKT019、地盤増幅率が高い IWT021 の f 値が同程度であり、地盤増幅率と f 値の関係性は明瞭には見られない。

(b) 周期 3～10 秒

図 2.4-9(d)より、周期 3～10 秒の f 値は 1.5～3 程度である。周期 2 秒以上の長周期成分では震源との位置関係の影響による方位依存性は明瞭ではなかったことと、距離減衰の影響がサイト間で同等であることから、震源・伝播・サイト特性から総合的に考えると、 f 値を決定づける主要因はサイト特性によるものと推察される。

図 2.4-9(d)より、IWT002 を境に地盤増幅率の大小によって f 値の平均的な値に差が現れていることがわかる。例えば、YMT014 の f 値は 1.3 であるのに対して、YMT015 の f 値は 3.4 と約 3 倍になっている。図 2.4-11 に示すそれぞれのスペクトルの周期 3～10 秒において、YMT014 と YMT015 の \bar{s}_v は同等であるが \bar{v}_E が YMT015 のほうが大きく、それに伴い YMT015 の f 値が大きくなっている。YMT014 の表層地盤の地盤増幅率は 0.78、 T_z （地震基盤から工学的基盤までの S 波の鉛直方向の伝播時間）は 0.84 秒である。一方、YMT015 の表層地盤の地盤増幅率は 1.07、 T_z は 0.87 秒である。したがって、周期 3.5 秒程度以上の長周期成分に対する深部地盤による増幅は同程度であるが、それよりも短周期成分に対する表層地盤による増幅は YMT015 のほうが相対的に大きいと考えられる。最上川沿いで堆積層が厚く発達し、周辺に比べて地盤増幅率が高い場所に位置する YMT015 では、周期 3 秒程度以下の揺れが増幅し入力エネルギーが増大した。その顕著な短周期の地震動が長周期帯のエネルギースペクトルにも影響を及ぼしたと考えられる。すなわち、地震動のフーリエ振幅スペクトルに対する減衰弾性 1 自由度系のエネルギースペクトルの伝達関数の特性が現れたものと考えられる。桑村・他(1992)の理論的解釈によれば、エネルギースペクトルは、減衰に起因する振動周期に基づいて決定されるウィンドウを用いて平滑化されたフーリエ振幅スペクトルとみなすことができる。減衰が大きいほど、また長周期構造物の 2 次以上の固有周期の振幅が大きいほど、構造物の振動周期の変動幅が大きくなるので、それに伴って平滑化のウィンドウ幅が広くなり、結果として 10%減衰のエネルギースペクトルの平均化がより進むことになる。一方、YMT014 ではそのような顕著な増幅は見られず、 \bar{v}_E が小さかったため、 f 値も小さくなったと推察される。

以上のように、 f 値の評価に 10%減衰のエネルギースペクトルを用いているため、結果的に、表層地盤の地盤増幅率とそのサイトの長周期帯（周期 3～10 秒）の f 値に大きく影響する場合があることが分かった。

ここで、地震基盤面までの深さと f 値の関係を考察する。数 km オーダーの深部の地下構造の厚さとそこを伝播する地震波の波長との対応を考えると、地震基盤上面までの深さと長周期帯の f 値においても、地盤増幅率と f 値と同様の対応関係があると推測できる。つまり、堆積層が厚く発達し地震基盤上面までが深い観測点で f 値が大きく、地震基盤上面までが浅い観測点で f 値が小さくなると考えられる。しかし、地震基盤上面深さ順に並べた図 2.4-10 では必ずしもそうっていない。これには地下構造の水平方向の広がり関係していると思われる。本検討では、地下構造の鉛直方向に関する特性のみに着目したため、この結果から深部地下構造のサイト特性の影響を総合的に判断することは難しい。

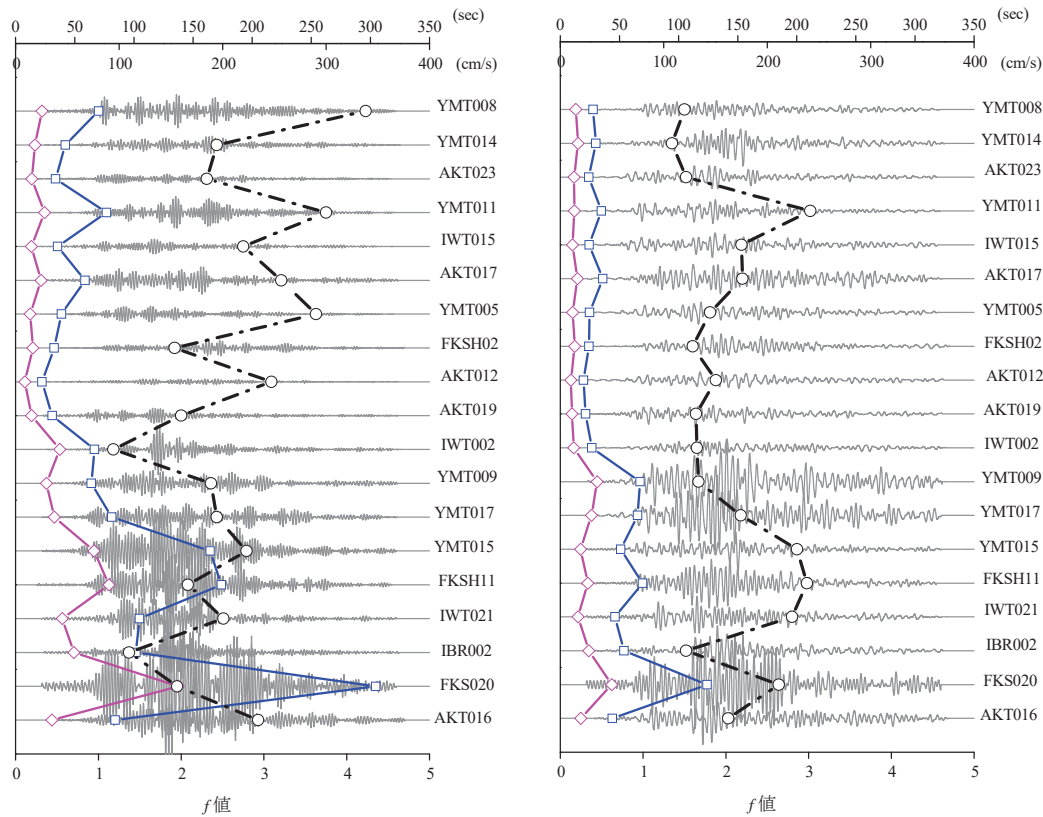
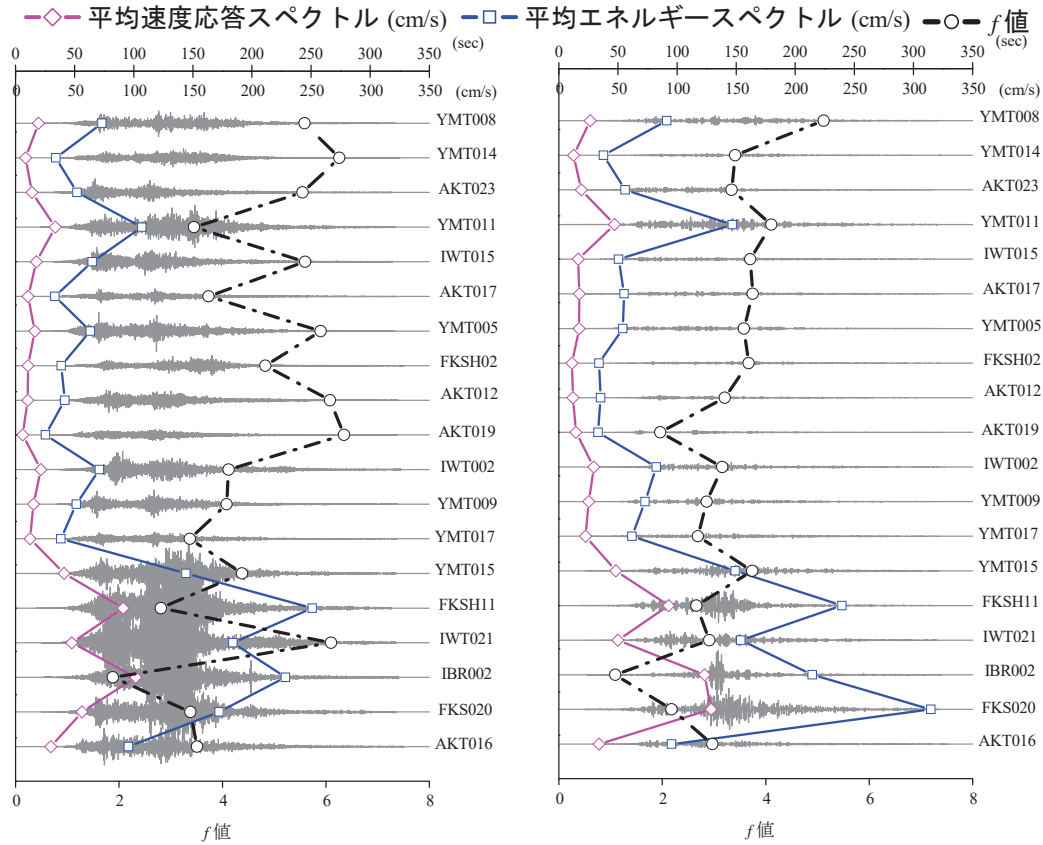


図 2.4-9 震源距離が同程度の観測点の時刻歴波形 (地盤増幅率順)

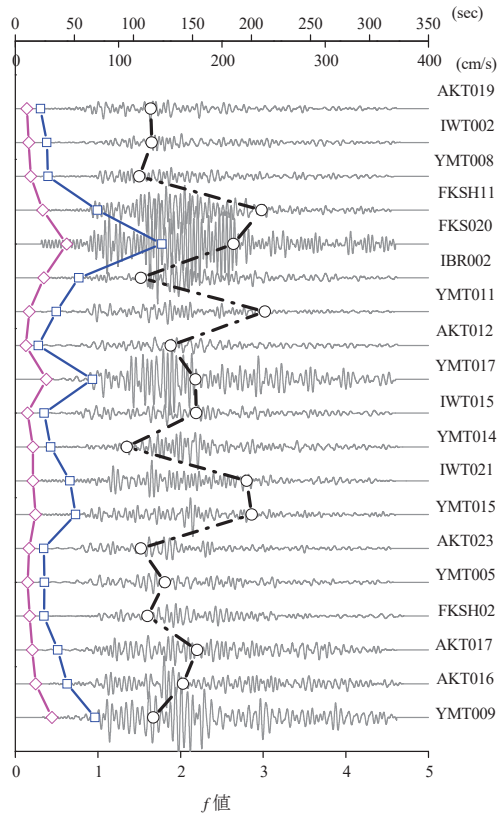
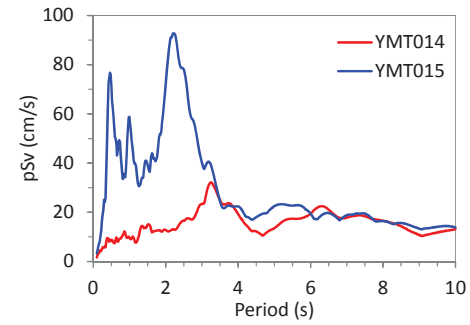
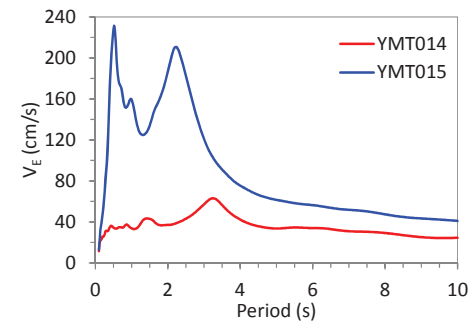


図 2.4-10 震源距離が同程度の観測点の周期 3~10 秒の速度波形(地震基盤面深さ順)



(a) 擬似速度応答スペクトル pS_v ($h=0.05$)



(b) エネルギースペクトル V_E ($h=0.1$)

図 2.4-11 YMT014 と YMT015 の擬似速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

2.4.3.2 サイト特性と f 値の関係の定性的評価

サイト地盤増幅特性と f 値の関係について周期帯毎に評価する。サイト地盤増幅特性の評価指標には、工学的基盤から地表までの表層地盤の増幅率と、サイト直下の地震基盤上面から工学的基盤上面までの S 波の鉛直伝播時間 T_z を用いた。表層地盤の増幅率は、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS の地盤増幅率 (V3) とした。 T_z は、佐藤・他(2014)と同様に(2.11)式により、地震調査研究推進本部の「長周期地震動予測地図」2009 年試作版、2012 年試作版に用いられている 3 次元地下構造モデルに基づき求めた。地震調査研究推進本部の地下構造モデルの範囲外の地点については、防災科学技術研究所の地震ハザードステーション J-SHIS の 3 次元地下構造モデル (V2) を用いた。

$$T_z = \sum_{i=1}^N \frac{H_i}{V_{Si}} \quad (2.11)$$

ここに、 H_i は地震基盤直上の層から工学的基盤層における i 番目の層の層厚、 V_{Si} は地震基盤直上の層から工学的基盤層における i 番目の層の S 波速度、 N は層数である。

2011 年東北地方太平洋沖地震と 2003 年十勝沖地震本震の表層地盤の増幅率と f 値の関係を図 2.4-12 と図 2.4-13 にそれぞれ示す。ここで、 f 値を求める際に擬似速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに補正は施していない。図 2.4-12 と図 2.4-13 より、いずれの地震、いずれの周期帯においても、地盤増幅率と f 値の関係のプロットは団子状に分布しており、一定の関係は認められない。2011 年東北地方太平洋沖地震と 2003 年十勝沖地震本震の T_z と f 値の関係を図 2.4-14 と図 2.4-15 にそれぞれ示す。図 2.4-14 と図 2.4-15 より、いずれの地震、いずれの周期帯においても、 T_z が 1 秒程度以下の範囲ではばらつきが大きい、 T_z が大きくなるにつれて収束する傾向がみられる。ただし、 T_z が 1 秒未満と 1 秒以上のデータ数が同程度であり、 T_z が小さいほうにデータが偏っているため、一概に整理することは難しい。2011 年東北地方太平洋沖地震に関しては、周期 2～3 秒と周期 3～10 秒では、 T_z が大きいほど f 値の下限値が若干大きくなる傾向が読み取れる。2003 年十勝沖地震本震に関しては、そのような傾向は認められない。

伝播経路内における盆地構造の橋渡し距離や、火山フロントなどの高減衰領域の有無など、個々のサイトで異なる伝播条件の影響が f 値に含まれているため、直下のサイト特性指標との明瞭な傾向を見出すには至らなかったと考えられる。しかしながら、例えば図 2.3-5(c)に示したように、関東平野部で長周期帯の f 値が相対的に大きくなることは、地理的分布からも明らかであった。サイト直下だけでなく周辺地域も含めた堆積盆地構造の水平方向の広がりや、地下構造の物性のコントラストが影響していると推察される。

なお、堆積盆地内での地震波の干渉により、継続時間が伸長し、建物への地震入力エネルギーが増大することが懸念される。設計用入力地震動としての長周期

長時間地震動の安全側を考えるならば、長周期帯の経時特性を評価する際には、サイト増幅特性、特に堆積層の厚さに関する指標である T_z に応じて、相対的に f 値を大きく評価するという対応も考え得る。

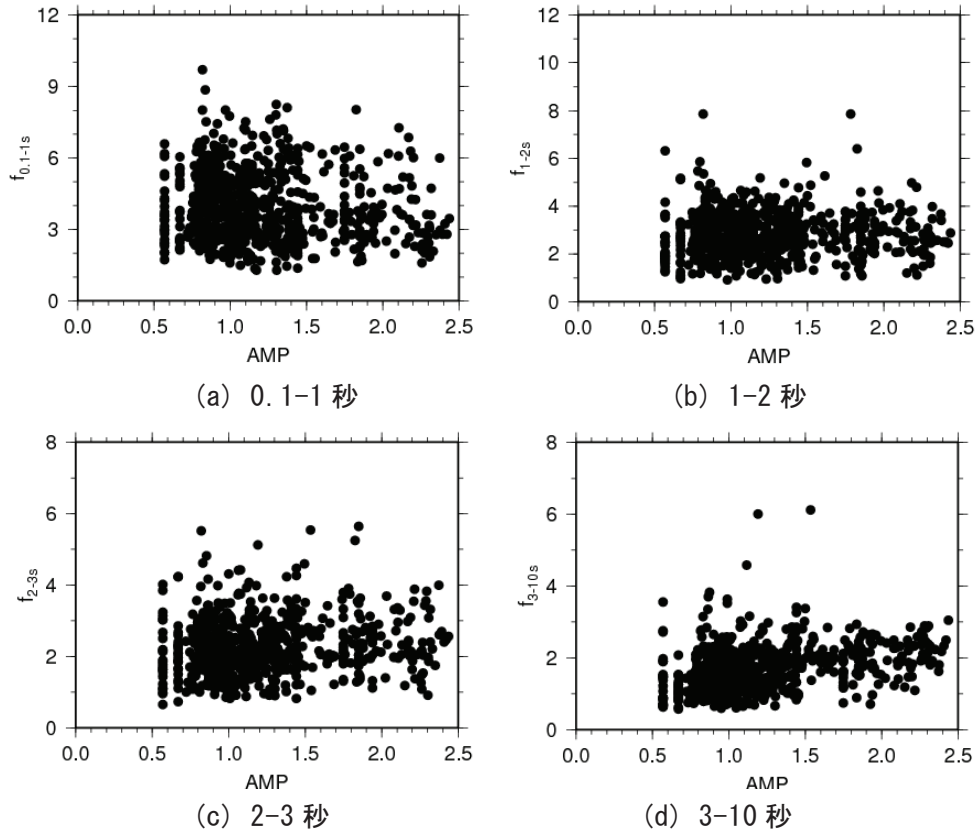


図 2.4-12 2011 年東北地方太平洋沖地震における表層地盤の増幅率と f 値の関係

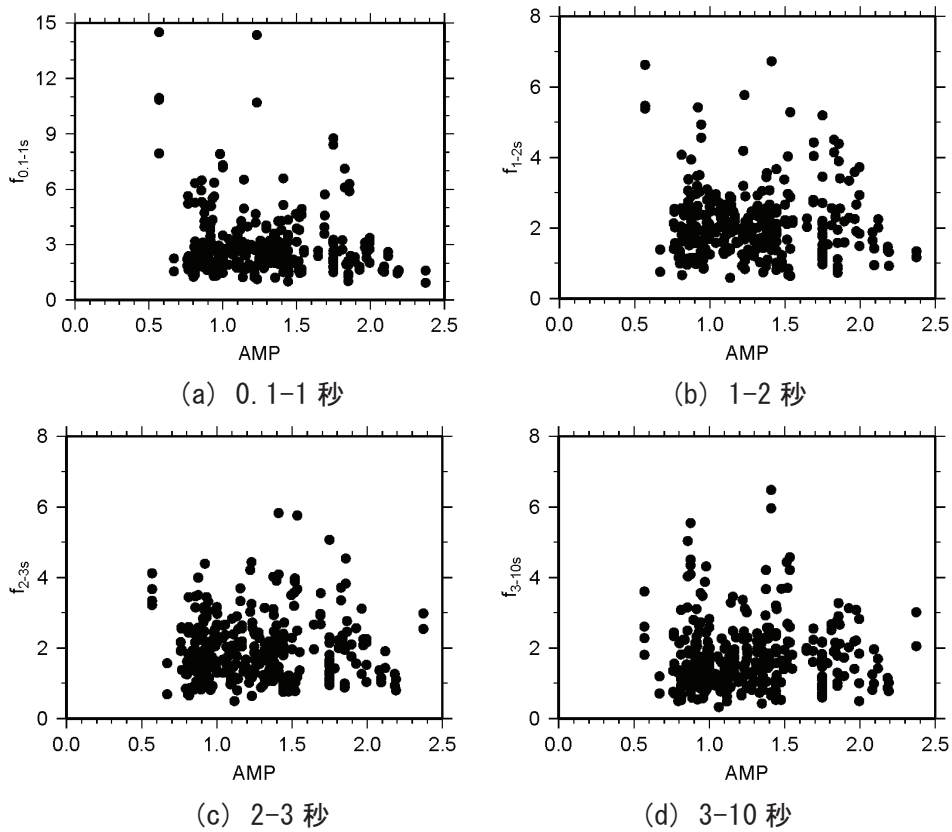


図 2.4-13 2003 年十勝沖地震本震における表層地盤の増幅率と f 値の関係

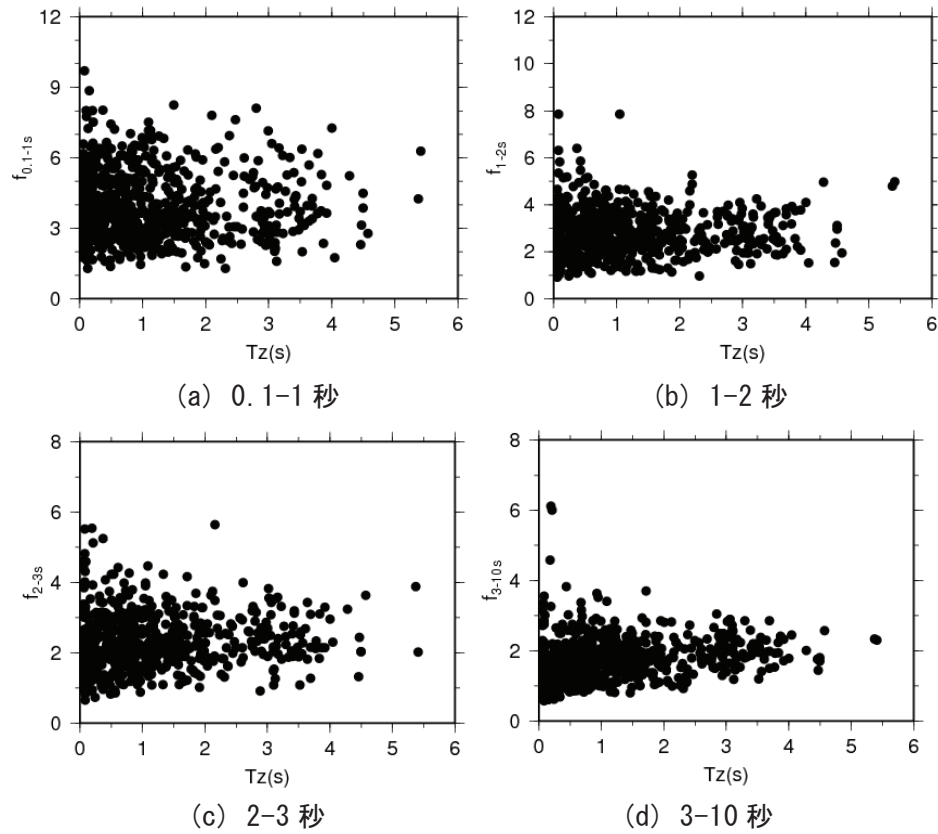


図 2.4-14 2011 年東北地方太平洋沖地震における T_z と f 値の関係

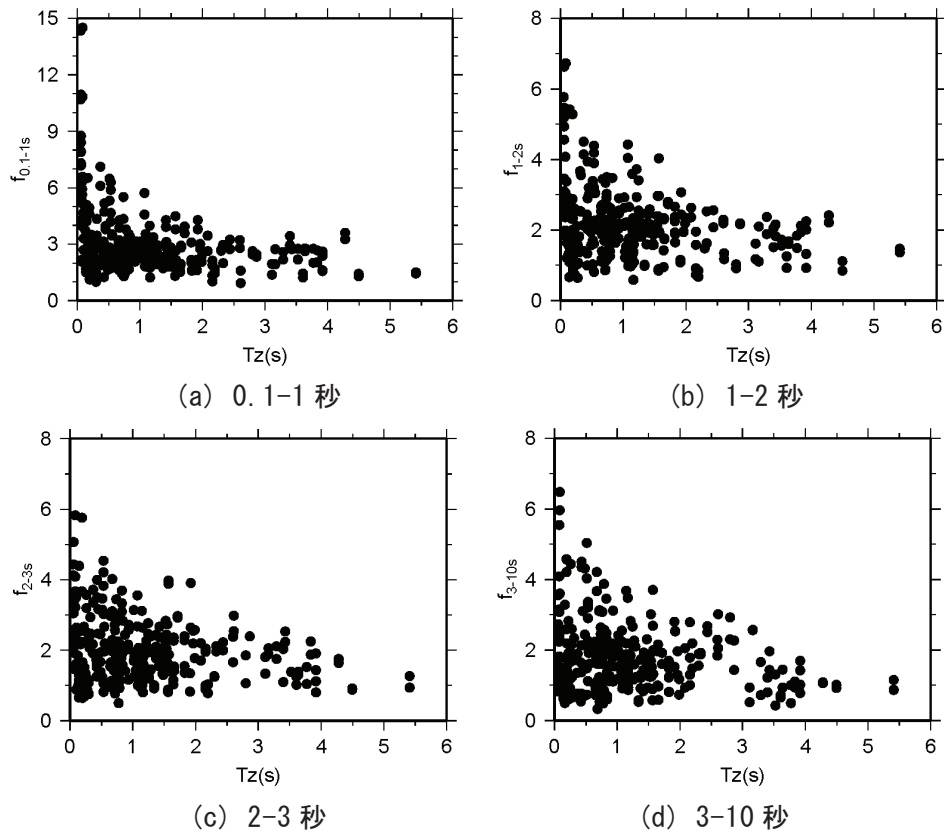


図 2.4-15 2003 年十勝沖地震本震における T_z と f 値の関係

2.4.3.3 堆積盆地構造の水平方向の広がり と f 値

2.4.3.1 節と 2.4.3.2 節では、地下構造の鉛直方向の特性を代表する指標である地盤増幅率および T_z を用いて、それらと f 値の関係について調べた結果、明瞭な傾向を見出すには至らなかった。しかしながら、例えば図 2.3-5(c)に示す関東平野部の f 値の分布ように、発達した堆積盆地構造周辺において、長周期帯の f 値が相対的に大きくなることは明らかであった。対象サイト直下だけでなく、その周辺地域も含めた堆積盆地構造の水平方向の広がりや、それに関連する地下構造の物性のコントラストが f 値に影響していると推察される。

そこで本節では、堆積盆地構造の水平方向の広がり と長周期帯の f 値の関係を調べることを目的として、2004 年新潟県中越地震を対象に、深い堆積盆地を通る測線上の観測点と硬質地盤を通る測線上の観測点における f 値を比べる。

2004 年新潟県中越地震の震源位置と測線を図 2.4-16 に示す。A-A'測線は、地震基盤が浅い硬質地盤を辿る、特段深い盆地構造がない伝播経路を表す測線である。B-B'測線と C-C'測線は、震源から地震基盤が浅い硬質地盤を経て関東平野に向かう伝播経路を表す測線である。D-D'測線は、新潟平野の厚い堆積層と山岳部の地震基盤が浅い硬質地盤を経て濃尾平野方面に向かう測線である。

はじめに、速度波形を観察する。各測線沿いの観測点の速度波形のペーストアップを図 2.4-17 に示す。図 2.4-17(a)より、A-A'測線沿いの速度波形は、伝播経路の途中で目立った増幅もなく、距離に応じて減衰していることがわかる。図 2.4-17(b)より、B-B'測線沿いの速度波形は、盆地端部の GNM011 で後続動の励起が確認できる。また、その先の GNM010、SIT002、および SIT003 にかけて後続動が増幅している。GNM011 付近で生成された表面波が、盆地内の厚い堆積層の影響で成長したものと考えられる。さらに、TKY022 と TKY017 では、その後続動がさらに顕著に増幅し、主要動 S 波部の振幅よりも後続動の振幅のほうが大きくなっている。C-C'測線沿いの速度波形も B-B'測線沿いと同様に、盆地構造の影響による後続動の増幅が確認できる。図 2.4-17(c)より、C-C'測線沿いの速度波形では、GNM010 の手前で生成されたとと思われる表面波が SIT003 付近で増幅し、盆地内を伝播した先の CHB028 や TKY025 でさらに成長している様子が見て取れる。なお、IBR015、CHB001、および IBR016 は、波形が途切れてしまっていたため、後続動の全様はわからない。IBR015 と IBR016 は、測線沿いの前後の波形に比べて主要動部分が減衰している。この 2 地点は、測線から若干外れた堆積層が浅めの位置であり、深い盆地構造の影響を受けにくかったと推察される。図 2.4-17(d)より、D-D'測線沿いの速度波形は、複雑な盆地構造により、NGNH28 と NGNH27 で特に後続動の表面波が励起していることがわかる。その後、山岳部を伝播する中で構造の不均質による散乱減衰をしたのち、濃尾平野周辺で若干増幅している。

次に、 f 値の計算に用いる \bar{s}_v と \bar{v}_E 、また f 値と相関の高い実効継続時間 t_0 、そして f 値の分布に注目する。各測線下の地震基盤上面($V_s=2.7\text{km/s}$)までの深さと周期 3~10 秒の \bar{s}_v 、 \bar{v}_E 、実効継続時間 t_0 、 f 値を図 2.4-18 に示す。図 2.4-18(a)より、

A-A'測線の \bar{s}_v と \bar{v}_E は、波形で確認された傾向と同様に、単純に距離減衰していることがわかる。A-A'測線の ${}_et_0$ と f 値は概ね一定値であり、ばらつきが小さい。図2.4-18(b)より、B-B'測線の \bar{s}_v は、盆地中心付近のSIT011で減少しているものの、盆地構造に合わせて増大していることがわかる。SIT011では盆地内の複雑な波の干渉が影響したものと推察される。なお、TKY022やTKY017においては、後続動部分で長周期の最大応答が決まっている。B-B'測線の \bar{v}_E は、振幅が小さかったSIT011と波形が途切れていたTKY006において相対的に小さくなっている他は、盆地端部から進むにつれて増大していることがわかる。この理由は ${}_et_0$ からも読み取ることができる。B-B'測線の ${}_et_0$ は、 \bar{v}_E と同様の分布を示しており、後続動を含めた継続時間の長短が \bar{v}_E に影響したと考えられる。 f 値も同様の分布であり、地点間の相対関係が \bar{v}_E および ${}_et_0$ とよく対応している。図2.4-18(c)より、C-C'測線の \bar{s}_v は、測線外れの堆積層が浅い位置であり主要動が減衰していたIBR015、CHB001、およびIBR016を除けば、盆地手前の地点よりも盆地内の地点のほうが倍以上に増大していることがわかる。C-C'測線の \bar{v}_E は、振幅が小さく波形が途切れていた3地点を除けば、B-B'測線と同様に、盆地端部から進むにつれて増大する傾向が現れている。C-C'測線の ${}_et_0$ は、CHB028とTKY025で顕著に長くなっている。表面波が顕著に励起された例であるが、伝播経路における盆地内の橋渡し距離が長い場合に、このような地震動になり得ると考えられる。C-C'測線の f 値は盆地内でばらついており、盆地深さとの関係の整理は難しいが、盆地手前の地点と比べて盆地内の地点では平均的な値が倍程度に大きくなっている。図2.4-18(d)より、D-D'測線の \bar{s}_v と \bar{v}_E は、波形で確認された傾向と同様に、概ね距離減衰していることがわかる。D-D'測線の ${}_et_0$ と f 値のばらつきは小さい。濃尾平野の中で ${}_et_0$ と f 値が若干増大しているが、B-B'測線やC-C'測線の関東平野ほどではない。盆地構造の深さにも依ると思われる。

以上より、2004年新潟県中越地震の関東平野の観測記録において、深い盆地構造に入る前の盆地端部での表面波の生成および盆地内部での表面波の成長に伴い、実効継続時間 ${}_et_0$ の伸長および \bar{v}_E の増大が見られ、盆地手前の地点よりも盆地内部の地点の f 値のほうが大きくなる傾向が確認された。ただし、測線から若干外れた堆積層が浅めの領域を経由したことによる減衰効果によって、 f 値が小さくなっている地点もあった。また、濃尾平野においても f 値の増大は確認されたものの、関東平野ほど顕著な傾向は現れていなかった。濃尾平野よりも手前の山岳部における散乱減衰の効果の影響で、後続動も十分に減衰していたことが要因と考えられる。

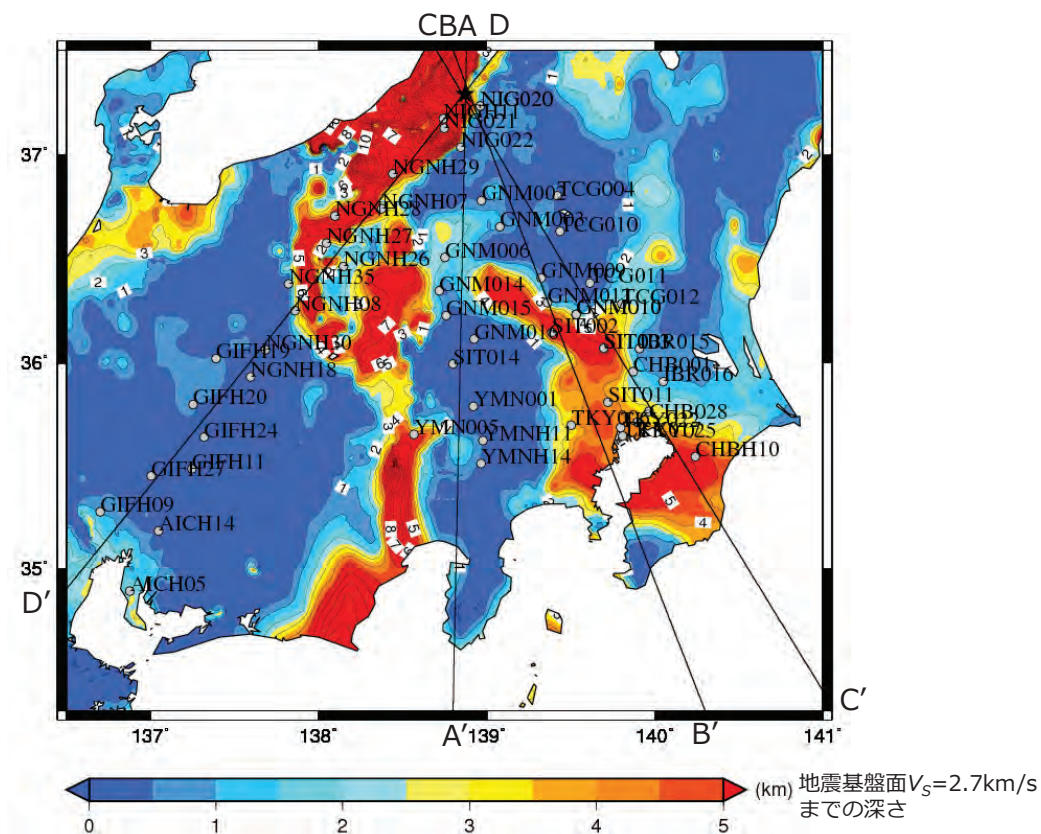


図 2.4-16 2004 年新潟県中越地震の震源位置と測線

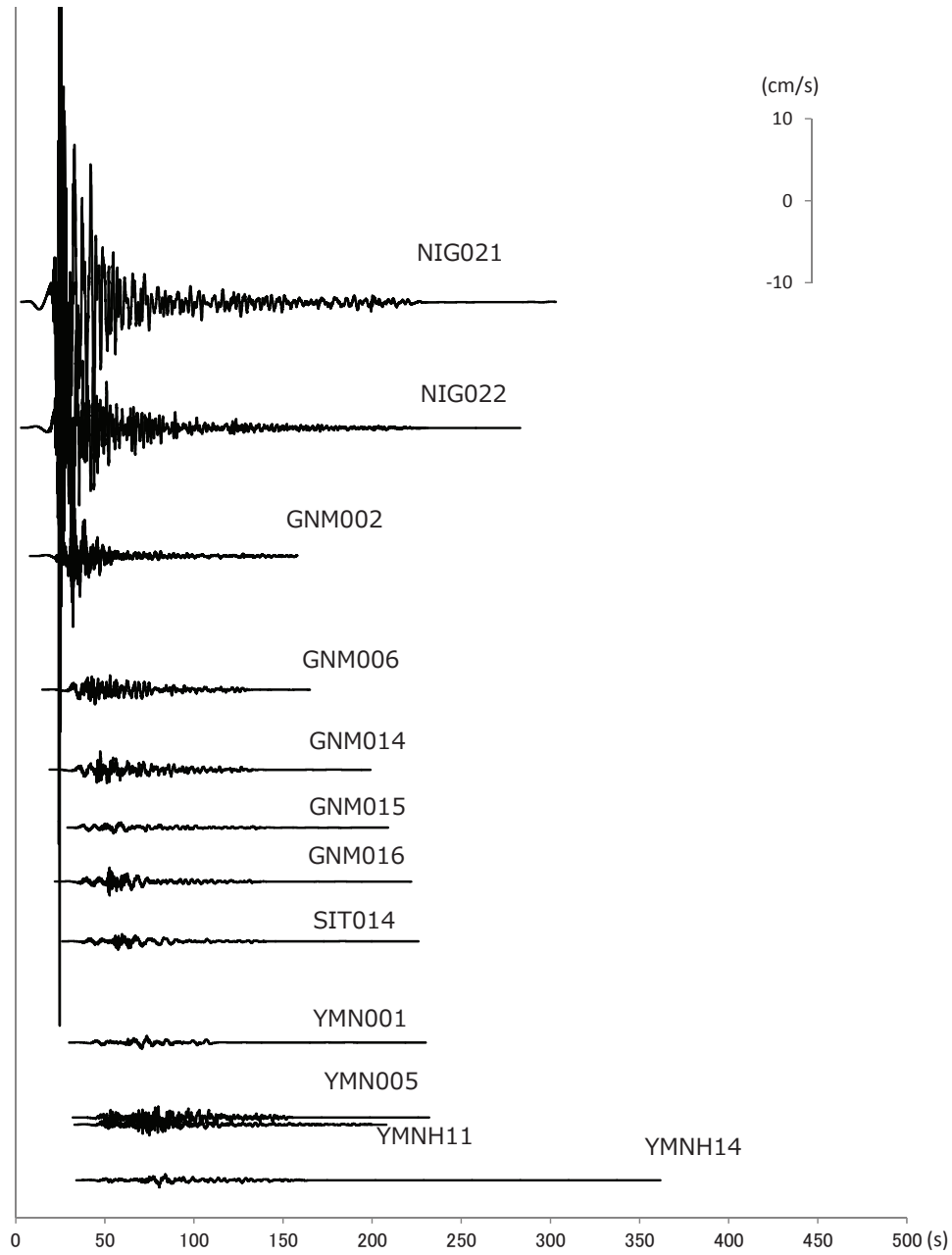


図 2.4-17(a) A-A' 測線沿いの観測点の速度波形のペーストアップ