

2011 年度 修 士 論 文

高次モーメントまで考慮した位相差分の統計量を基にした 模擬地震動作成手法に関する研究

Study on generation of the design artificial ground motion based on
statistical values of phase difference including higher moments

永雄 健一
Nagao, Kenichi

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

目次

1. はじめに	1-1
1.1 研究の背景と目的	1-1
1.2 既往の研究	1-2
1.3 論文の構成研究	1-5
1.4 位相差分 $\Delta\phi$ の定義	1-6
1.5 標準偏差 σ , 歪度 β_3 , 尖度 β_4 の定義	1-8
1.6 検討した地震とその諸元について	1-9
第一章の参考文献	1-10
2. $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ の特性	2-1
2.1 全周波数帯域における結果	2-1
2.2 帯域における結果	2-28
2.3 まとめ	2-56
第二章の参考文献	2-56
3. 外れ値についての考察	3-1
3.1 外れ値の定義	3-1
3.2 定量的評価の方法	3-3
3.3 解析データについて	3-4
3.4 結果	3-4
3.5 外れ値なしの統計量	3-5
3.6 まとめ統計量	3-74

第三章の参考文献	3-74
----------	------

4. 位相差分の σ の推定に関する検討	4-1
4.1 エネルギー減衰 (<i>Energy Attenuation, E.A.</i>) を用いた σ の推定方法について	4-2
4.2 解析の概要	4-5
4.3 結果	4-6
4.3.1 2000 年鳥取県西部地震における結果	4-6
4.3.2 2004 年新潟県中越地震における結果	4-16
4.3.3 2005 年福岡県西方沖地震における結果	4-26
4.3.4 2007 年能登半島沖地震における結果	4-36
4.3.5 2007 年新潟県中越沖地震における結果	4-46
4.3.6 2008 年岩手・宮城内陸地震における結果	4-56
4.3.7 2003 年十勝沖地震における結果	4-66
4.3.8 2005 年宮城県沖地震における結果	4-76
4.3.9 2011 年三陸沖地震における結果	4-86
4.3.10 2001 年芸予地震における結果	4-96
4.3.11 2001 年岩手県内陸南部地震における結果	4-106
4.3.12 2003 年宮城県沖地震における結果	4-116
4.3.13 2009 年駿河湾沖地震における結果	4-126
4.4 特徴的ないくつかの観測点について	4-136
4.5 全体的な傾向	4-143
4.5.1 直下型地震	4-143
4.5.2 プレート境界地震	4-148
4.5.3 スラブ内地震	4-153

4.6 まとめ	4-158
第四章の参考文献	4-158
5. 位相差分とフーリエ振幅の関係のさらなる考察	5-1
5.1 いくつかの波形についての検討例	5-1
5.2 位相差分とフーリエ振幅の関係性を満足させるアルゴリズムについて	5-18
5.3 因果性を満たす地震動とそうでない地震動の比較	5-28
5.3.1 応答スペクトルによる比較	5-30
5.3.2 地震動の包絡形による比較	5-32
5.4 まとめ	5-34
第五章の参考文献	5-35
6. 模擬地震動作成手法の提案	6-1
6.1 模擬地震動作成手法	6-1
6.2 模擬地震動作成例	6-5
6.3 まとめ	6-19
第六章の参考文献	6-20
7. 結論	7-1
APPENDIX	Appendix-1
Appendix. A	Appendix-2
Appendix. B	Appendix-53
Appendix. C	Appendix-75

謝辭

梗概

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

地震大国である我が国では超高層建築や原子力発電所のような、被害を受けた時に社会的インパクトが大きい大規模な構造物の設計に際して、設計用模擬地震動を用いた動的応答解析を施す。そのような模擬地震動の策定方法の一つに、設計用目標応答スペクトルと位相情報（ここで議論される位相差分特性はそのうち最も重要な一つである）を与え、フーリエ逆変換して波形を合成するというものがある。

位相差分の与え方として過去の有名な地震動から得られた位相差分を用いたり、位相を一般的なランダム変数とてから波形を合成し、Jennings の包絡関数のような経時特性を乗じるといった方法がある。しかし両者の方法は構造物が設計される地点と震源断層との位置関係や伝播経路、地震動の周波数特性といった重要な要素を十分に考慮に入れているとは言い難い。

一方で大崎・他（1978）¹⁾ が位相差分のヒストグラム（以下、位相差分分布）と地震動の包絡形の類似性を指摘したことをきっかけとして、地震動の位相差分特性の研究が始まった。そして位相差分の平均値 μ は波形の包絡形において振幅がピークに達する時間、標準偏差 σ は主要動の継続時間の目安になるといった指摘を受け、 σ とマグニチュードや震源距離の関係を論じた例（例えば石井・渡辺（1987）²⁾、山根・長橋（2005）³⁾）や σ の値を基に模擬地震動を作成しその特性を検討した例もある（例えば壇・他（1982）⁴⁾ や壇・他（1983）⁵⁾）。しかしながら位相差分の高次モーメント、特に歪度 β_3 と尖度 β_4 に関しては大川（1980）⁶⁾ がその博士論文の中でいくつかの波形の β_4 を計算して”地震動の位相差分の β_4 は正規分布の β_4 と同等もしくはそれ以上”と述べ、岩崎・他（1988）⁷⁾ が”位相差分の β_3 はほとんど 0.5 以下である”と述べている以外には（著者の知っている限り）特に議論がなされていない。一般に β_3 は確率密度の左右非対称の度合いを、 β_4 はピーク付近の立ち上がりの鋭さを表す指標である。一方で岩崎・他（1988）⁷⁾ や Papoulis (1977)⁸⁾ が述べているように位相差分（Papoulis は群遅延時間について議論しているが）は隣り合う二つの周波数成分波による波形の包絡形のピーク位置を表す。

このことを踏まえると β_3 と β_4 が考慮された位相差分を定義することが出来れば、実際の波形に特徴的である応答特性や、急峻な立ち上がりとピークへの到達、そしてなだらかな減衰といった経時特性を持った模擬地震動を作成出来る可能性がある。

ここで Fig.1.1 に 2000 年鳥取県西部地震の KiK-net 日野サイト（地中・NS 成分）の波形を、Fig.1.2 に Fig.1.1 の波形の位相差分と同じ $\mu \cdot \sigma$ を有する正規乱数を位相差分と見なして合成された模擬地震動を示す。この二つの波形の間には a) Fig.1.1 の波形に比べて Fig.1.2 の波形の方が初動部と後続部の振幅が大きい、b) Fig.1.2 の波形の方が PGA が小さい、c) Fig.1.1 の波形は急激にピークに達しなだらかに減衰しているが、Fig.1.2 の波形はピークを中心に左右対称に近い、といった相違点がある。

そこで本研究では従来は考慮されてこなかった位相差分の β_3 と β_4 まで検討範囲を拡張し、位相差分の高次モーメントを含む統計的性質に基づいた模擬地震動作成手法について議論していく。

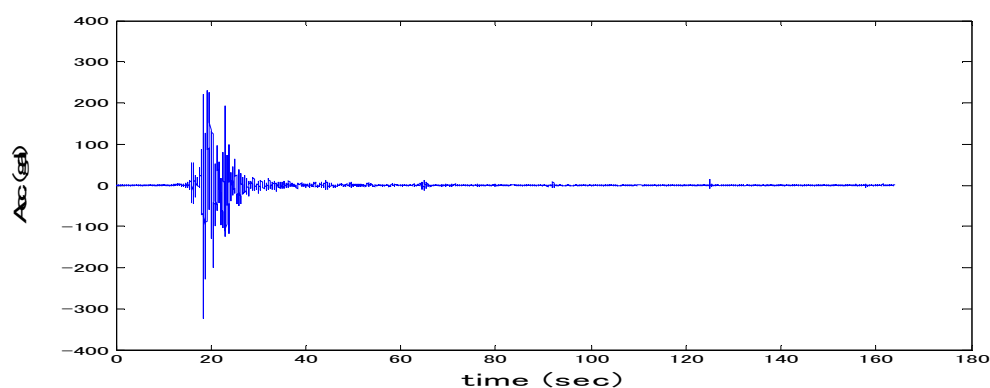


Fig.1.1: example of ground motion in 2000 Tottoriken seibu earthquake

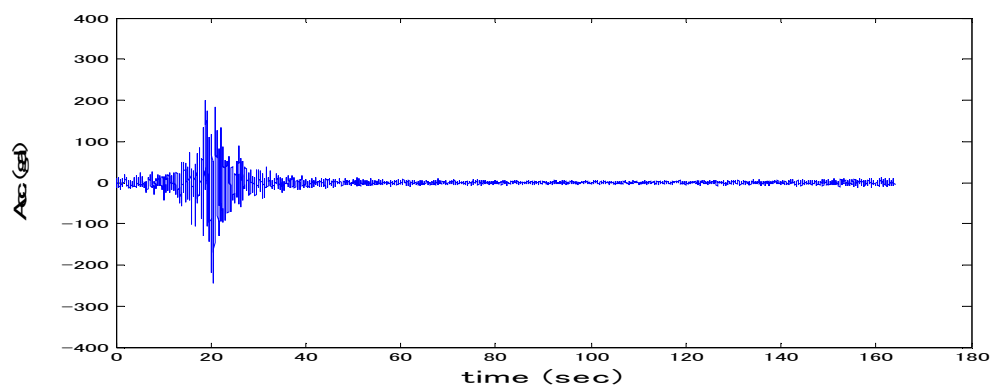


Fig.1.2: example of simulated ground motion assuming its phase differences as normal random variables and using the same Fourier amplitude as in Fig.1.1

1.2 既往の研究

地震動の位相差分は大崎・他（1978）¹⁾によって隣り合う二つの位相角の差として定義され、そのヒストグラムである位相差分分布と地震動波形の包絡形の類似性が初めて指摘された。大川（1980）⁶⁾は位相差分分布を Jennings の包絡関数と類似した確率分布と見なすことによって位相差分を定義し、模擬地震動を作成する手法を提案している。大崎（1994）⁹⁾においてもこの”位相差分スペクトル法”と呼ばれる手法について解説が加えられている。また岩崎・他（1988）

⁷⁾ は位相差分が隣り合う二つの周波数成分の合成波形の包絡形のピーク位置を表すことを数理的に説明している.

この時期以降, 位相特性を利用した模擬地震動の作成手法について様々な研究が行われてきた. その代表的なものが, 大崎を中心とした一連の”模擬地震動作成法の改良について”であろう. それらの一つずつ簡潔に説明していく.

まず大崎・他 (1982) ¹⁰⁾ は位相角をランダムとして与えて波形を作成し, 後に包絡関数を経時特性として乗じた模擬地震動が低減衰 (特に 1%減衰) かつ高周波数の構造物に対して過大な応答を示すことを指摘した. この問題点を踏まえて岡田・他 (1982) ¹¹⁾ は非定常スペクトルと位相差分から導かれた位相二階差分の統計的性質を論じた. そして位相二階差分のヒストグラム形状は正規分布に近いと述べている. 政尾・他 (1982) ¹²⁾ はインパルスの位相を用いた模擬地震動の作成法について触れ, 帯域 6.0 – 14.0 Hz の位相をインパルスの位相として, 他の帯域ではランダム位相を仮定すると 6.0 – 14.0 Hz における 1%減衰の応答スペクトルが低減すると述べた. また壇・他 (1982) ⁴⁾ は矩形の位相差分分布を仮定し, その幅を様々に変えることによって作成した模擬地震動の応答スペクトル特性を検討した. その結果, 矩形の幅が広いほど, 1%減衰のスペクトル応答値が大きくなると述べている. それに対して神田・他 (1982) ¹³⁾ はガウス波合成法による模擬地震動作成方法について検討し, 隣り合う二つのガウス波の位相の差を変えることによって波形を合成し, それらの 1%減衰応答スペクトル特性について議論した. そして, 正弦波よりガウス波を用いて合成された波形の方が 1%減衰の応答スペクトルが 10 Hz 以上の高周波数帯域で低減することを指摘した.

1983 年になって奈良岡・他 (1983) ¹⁴⁾ は自然地震動波形の非定常スペクトルとランダム位相を基に波形合成を試み (非定常スペクトル法), 得られた波形の 1%減衰スペクトル応答値が正弦波合成法による波形の 1%減衰スペクトル応答値を下回るとしている. 次に北田・他 (1983) ¹⁵⁾ はビート波合成法を提案した. この方法はまず, 元の波形をチェビシェフフィルターによって分解し, 各々の要素波毎に周波数差 Δf を定めることでビート波状の繰り返しを作る. そしてその繰り返しの一つに着目して要素波とする, というものである. この手法も低減された 1%減衰スペクトル応答値を与えた. 一方, 渡辺・他 (1983) ¹⁶⁾ は自然地震動について中心周波数 2 Hz 以上を対象に狭帯域の位相差分分布を求め, 全周波数帯域を対象とした時のそれと比較した. そして狭帯域における位相差分の標準偏差 σ は全周波数を対象にした時の σ より小さいと指摘した. それを踏まえて壇・他 (1983) ⁵⁾ は狭帯域毎に別々に定義された, 矩形あるいは正規分布に従う位相差分を定義し, それを基に模擬地震動作成を試みた.

また政尾・他 (1983) ¹⁷⁾ はまず, インパルスの位相を用いた模擬地震動が低減衰の応答スペクトルの最小値を与えると見受けられ, かつその応答曲線がなめらかな形状であることに着目した. そして応答曲線のなめらかさを保ちつつ, インパルスの位相を用いた時よりスペクトル応答値を上昇させて, 1%・5%減衰両方の目標応答スペクトルに適合する模擬地震動の作り方を議論した. 彼らは位相角を周波数 f の二次関数により表し, f^2 の係数を変化させた時の応答を比べた. そして係数と 1%減衰スペクトル応答に正の相関があること, 高周波数になるほどスペク

トル応答値が上がることを指摘した。それに対して坂田・他（1983）¹⁸⁾は位相角を f の一次関数と指数関数の和で定義し、同様の検討を行った。そして指数関数モデルで位相角を表せば、かなり広範囲の周波数帯域で1%・5%減衰両方の応答スペクトルと適合する模擬地震動を作成できると結論付けた。

これらの一連の報告の中で位相差分特性について議論したのは壇・他（1982）⁴⁾、渡辺・他（1983）¹⁶⁾、そして壇・他（1983）⁵⁾である。これらはいずれも位相差分をある中心と幅を有する矩形あるいは正規分布と仮定し、模擬地震動の応答特性を検討した。

一方、位相特性を基に模擬地震動作成を試みた比較的新しい報告例に、山根・長橋による一連の”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”がある。彼らはまず山根・長橋（2002）¹⁹⁾で位相差分分布の形状が波形の経時特性と類似することを岩崎・他（1988）⁷⁾と類似した理論を用いて説明し、山根・長橋（2002）²⁰⁾では位相差分分布の分散性の要因として見かけの位相速度の揺らぎやアスペリティの広がりなどを挙げている。山根・長橋（2003）²¹⁾で彼らは一次元重複反射理論においては基盤波と地表波の位相特性はそれほど変化しないことを示した。また山根・長橋（2005）³⁾では2003年十勝沖地震の各観測点における波形の位相差分の σ を算出し、その値の違いを破壊伝播のディレクティビティ効果によって説明している。彼らは断層破壊進行方向と直行方向で別々に位相特性を定義し、模擬地震動を作成、観測波形と比較している。

以上の報告は実体波の水平動に関する検討であるが、山根・長橋（2006）²²⁾と山根・長橋（2007）²³⁾において彼らはそれぞれ地震動の鉛直成分と表面波の位相差分特性について議論した。前者では地震動の鉛直成分の位相特性と水平成分の位相特性の相関性に言及した。後者においては堆積盆地で表面波が増幅されやすいことに触れ、堆積盆地内と盆地外で別々の位相差分の標準偏差 σ を定義する方法を試みた。

以上、位相特性から模擬地震動作成を試みた研究を紹介した。大崎を中心とした研究では模擬地震動の位相差分情報を（乱数で与えるのではなく）定義することにより、低減衰かつ固有周波数が高い構造物のスペクトル応答値を低減できることを示したと要約できる。また山根・長橋の試みは位相差分の σ を震源からの距離の関数で記述することにより、位相特性を定義し模擬地震動を作成する方法を提案した、と言えるだろう。しかしこういった既往の研究では位相差分分布の広がりやの指標である σ より高次のモーメントについて言及されていない。位相差分のヒストグラムと波形の包絡形の類似性を前提とする以上、ヒストグラム形状をより正確に規定するパラメータの特性を検討する必要がある。また σ を含めた位相差分の統計量はある程度細かい周波数帯域において、別個に算出されるべきだろう。さらに位相差分の σ は本当に震源からの距離のみで記述されうるか、そしてその記述方法も地震のメカニズムや規模において異なるか否かも、著者の知る限り詳しく多くは議論されていない。

以上の、これまで議論されて来なかった観点に着目し、位相差分の高次モーメントまで考慮に入れた新しい模擬地震動作成手法について本論文では議論する。

1.3 論文の構成

本節では本論文の各章で何が論じられているのかを大観する。

まず第一章では研究の背景と目的に続いて既往の研究例を紹介し、現状まで検討されてきた位相差分研究の流れや手法、そして検討されて来なかったポイントや課題について触れる。本節で論文の構成を紹介した後、位相差分やその統計量を定義する。そして解析に用いた地震を表にまとめた。

第二章ではそもそも位相差分の σ 、 β_3 そして β_4 の間に関係があるか、あればどのような関係かを最初は全周波数帯域で、次にある程度細かく分割した周波数帯域で検討した。

第三章では位相差分の平均から離れた少数のデータが β_3 と β_4 の値に大きな影響（ばらつき）を与えることに言及し、そのような”外れ値”は統計量の計算から除けるかをフーリエ振幅との関係から論じた。

第四章では震源からの距離だけで位相差分の σ を推定する現状の方法の課題を指摘し、震源からのエネルギー減衰率という新しい指標で σ を推定する方法を提案した。結果は最後の部分で地震のメカニズム毎に整理した。

第五章では位相差分とフーリエ振幅の関係を議論した。本章の内容は位相差分の統計量と直接関係はない。しかし実際の地震動においてはフーリエ振幅と位相差分の間に関係性があり、その関係性を基に位相差分とフーリエ振幅を対応させていくことで、自然現象らしい模擬地震動を作成しようと考えたため、本章を論文に入れた。そして実務で用いるなめらかなスペクトルを位相差分の値を基に振幅レベルを保持しながらぎざぎざさせるアルゴリズムを提案した。

第六章では以上の知見を踏まえ、いくつかの地震と観測点のケースを仮定し、各々について模擬地震動を作成した。第六章は第二章から第五章までの内容を取り入れた総合応用問題のような意味合いを持つ。

第七章では本論文で得られた知見をまとめる。

以上から本論文は導入部分の第一章、波形合成の第六章とまとめの第七章を除けば、大きく分けて三つの部分から構成されていると言える。第二章と第三章で高次モーメントの特性を検討し、第四章で位相差分の σ の推定法を議論し、第五章で位相差分とフーリエ振幅の関係について論じている（次の図を参照のこと）。

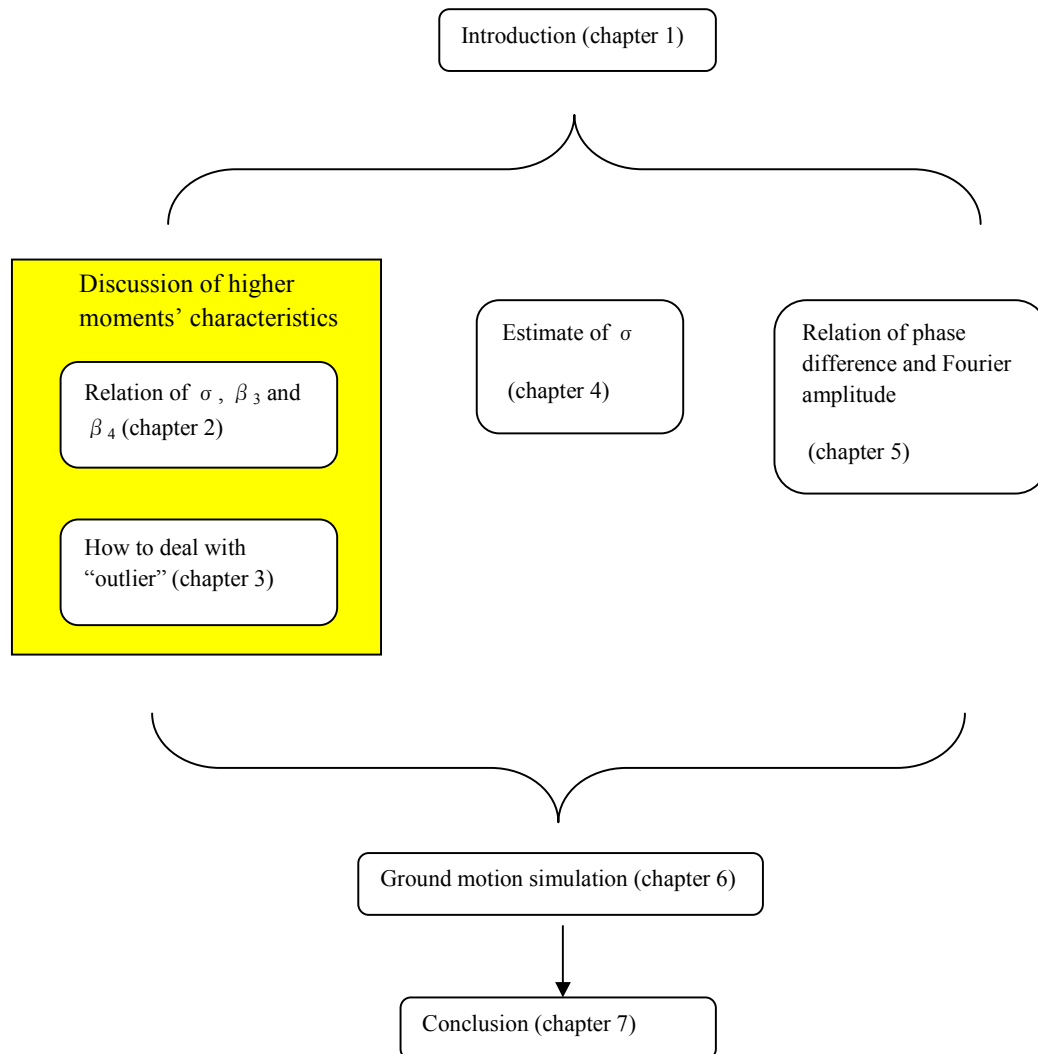


Fig.1.3: structure of this thesis

1.4 位相差分 $\Delta\phi$ の定義

大崎・他（1978）¹⁾は次のように位相差分を定義した.

$$\Delta\phi_k = \phi_{k+1} - \phi_k \quad (k=1, 2, \dots, N/2-2) \quad (1.1)$$

ここに N = データ数

ϕ = 位相角

$\Delta\phi$ = 位相差分

本論文では位相差分 $\Delta\phi$ は全て0から -2π の範囲にある負の値になるように算出した.

大崎・他(1978)¹⁾は位相差分分布が波形の包絡形の形状と類似していることを初めて指摘した. Fig.1.4にその一例を示す. 上の加速度波形において振幅が最大になる点が下の位相差分分布の平均に, そして上の波形における大きな振幅の継続時間が下の位相差分分布の広がりに対応している. また岩崎・他(1988)⁷⁾は位相差分が二つの隣り合う周波数成分波の包絡形のピーク位置を示すことを数理的に証明した. 同様の数理的な説明はPapoulis(1977)⁸⁾にも見出すことが出来る. よって位相差分の平均値は地震の振幅がピークに達するときの時間を表し, 標準偏差は地震の主要動の継続時間に対応する. このように位相差分は波形の非定常性・経時特性を決定する重要なファクターであることが分かる.

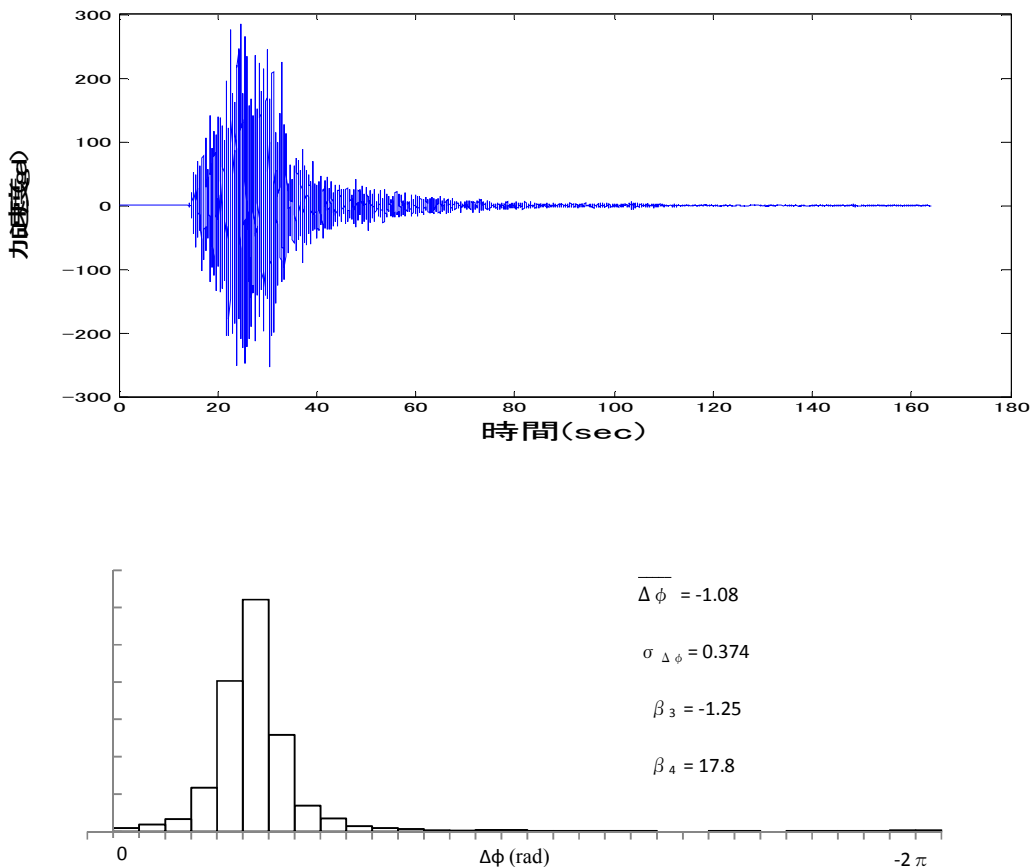


Fig.1.4: examples of ground motion and its phase difference distribution

1.5 標準偏差 σ , 歪度 β_3 , 尖度 β_4 の定義

以下の式 (1.2), (1.3), (1.4)によって位相差分の標準偏差 σ , 歪度 β_3 , 尖度 β_4 をそれぞれ定義した. なお統計その他の分野で幅広く使用されている正規分布は平均 μ , 標準偏差 σ のみをパラメータとしており, 歪度 β_3 , 尖度 β_4 はそれぞれ 0.0, 3.0 である.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta \phi_i - \overline{\Delta \phi})^2 \quad (1.2)$$

$$\beta_3 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta \phi_i - \overline{\Delta \phi})^3}{(n \sigma_{\Delta \phi}^3)}}{\quad} \quad (1.3)$$

$$\beta_4 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta \phi_i - \overline{\Delta \phi})^4}{(n \sigma_{\Delta \phi}^4)}}{\quad} \quad (1.4)$$

ここに、 $\overline{\Delta \phi}$ = 位相差分の平均値

σ = 位相差分の標準偏差

β_3 = 位相差分の歪度

β_4 = 位相差分の尖度

n = サンプル数

なお位相差分は 2π の周期を持つ. 統計量の計算のためには平均から離れたデータが σ , β_3 , β_4 に与える影響を出来るだけ減らすため, 統計量の算出に際しては位相差分のデータが全て平均周り $\pm\pi$ に収まるようデータを操作した.

イメージをつかみやすいように Fig.1.5, Fig.1.6 にそれぞれ β_3 , β_4 が異なる分布の概形を示す. この二つの図を見ると分かるように, β_3 は分布の歪み度合いを表し, β_4 は分布の尖り度合いを表す. β_3 が負の時に分布は右側に歪み, 正の時に左側に歪む. また β_3 が 0 の時では分布は左右対称である. そして β_4 が大きい分布は β_4 が小さい分布よりピーク付近の勾配が急である.

なお Fig.1.4 の例から分かるように位相差分分布においては通常の座標軸と反対で, 0 から見て右方向が負である. そのため, 例えば位相差分分布の形状が右側に歪んでいても, 通常の座標軸に変換すれば歪みは左側であり β_3 は負となる.

こういった統計学的な知識から, 位相差分の β_3 は波形の振幅最大点を中心とした左右の非対称の度合い, β_4 は波形の振幅最大点付近の尖りの度合いの目安を与えられる.

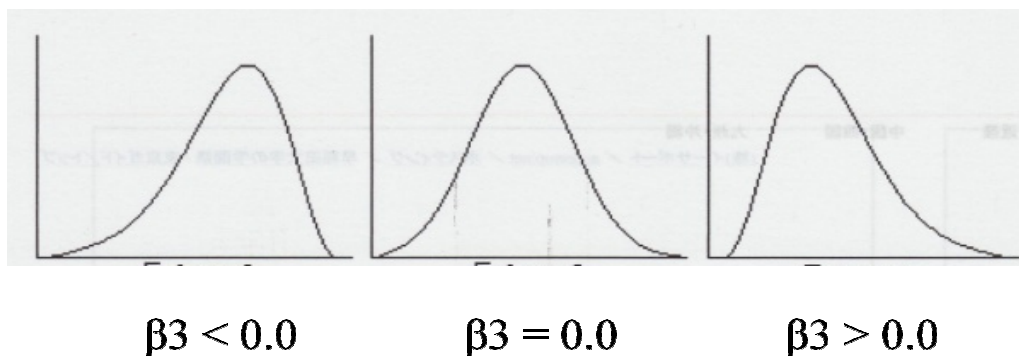


Fig.1.5: several distributions with different β_3 values

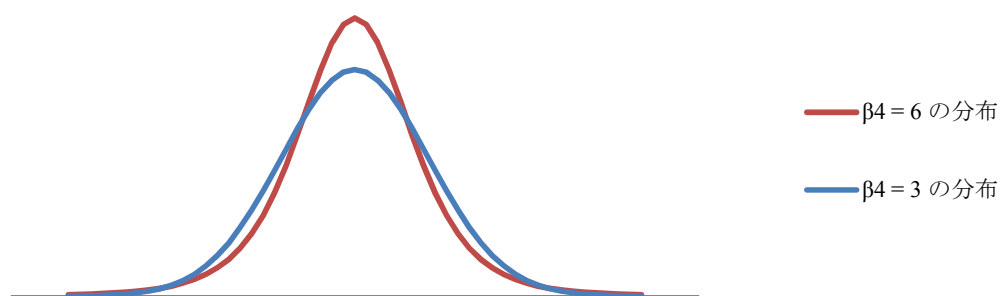


Fig.1.6: several distributions with different β_4 values

1.6 検討した地震とその諸元について

地震にはプレート表層部の断層がずれて発生する直下型 (crustal), 大陸プレートと海洋プレートの境界で発生するプレート境界 (interface), そして地表から深い, プレート内部で発生するスラブ内 (intraplate) の三タイプがある. また直下型とプレート境界は正断層型 (normal), 逆断層型 (reverse), 横ずれ型 (strike) の三つに大別出来る.

本論文では地震のマグニチュードと発生メカニズムが異なる地震を合計 13 個選択し, それぞれの観測波形を解析した. その地震の諸元を Table.1.1 に示す. 各地震について震央距離が 350km 以内 (2003 年十勝沖地震については 450km 以内) に位置する防災科学技術研究所の KiK-net 地中観測点で記録された水平方向二成分 (すなわち NS 成分と EW 成分) について解析を行った. 各地震で対象とした波形の数は Table.1.1 の第六列目に示されている.

Table.1.1: earthquakes' data analyzed in this thesis

No.	Name	Occurrence date	M_w	Depth	# of waves	Mechanism	Hypocenter location
1	Tottoriken seibu	2000/10/06	6.6	11 km	306	Crustal, strike	Long. 133.35 Lat. 35.28
2	Niigataken chuetsu	2004/10/23	6.6	13 km	496	Crustal, reverse	Long. 138.87 Lat. 37.29
3	Fukuokaken seihouoki	2005/03/20	6.6	9 km	274	Crustal, strike	Long. 130.18 Lat. 33.74
4	Notohanto oki	2007/03/25	6.7	11 km	372	Crustal, reverse	Long. 136.69 Lat. 37.22
5	Niigataken chuetsu oki	2007/07/16	6.6	17 km	524	Crustal, reverse	Long. 138.61 Lat. 37.56
6	Iwate - Miyagi nairiku	2008/06/14	6.9	8 km	286	Crustal, reverse	Long. 140.88 Lat. 39.03
7	Tokachi oki	2003/09/26	7.9	42 km	348	Interface, reverse	Long. 144.07 Lat. 41.78
8	Miyagiken oki	2005/08/16	7.1	45 km	290	Interface, reverse	Long. 142.28 Lat. 38.15
9	Sanriku oki	2011/03/09	7.2	8 km	212	Interface, reverse	Long. 143.28 Lat. 38.33
10	Geiyo	2001/03/24	6.7	51 km	288	Intraplate	Long. 132.71 Lat. 34.12
11	Iwateken nairikunanbu	2001/12/02	6.5	122 km	272	Intraplate	Long. 141.26 Lat. 39.40
12	Miyagiken oki	2003/05/26	7.0	70 km	300	Intraplate	Long. 141.68 Lat. 38.81
13	Surugawan	2009/08/11	6.2	23 km	438	Intraplate	Long. 138.50 Lat. 34.78

KiK-net の地震波形は基本的にはサンプリング周波数が 200 Hz である. ただしいくつかの地震, 例えば 2011 年三陸沖地震の記録波形は, サンプリング周波数が 100 Hz である. その場合には線形内挿によって隣り合うデータ間を補完して, サンプリング周波数が 200 Hz となるようにした.

第一章の参考文献

- 1) 大崎順彦, 岩崎良二, 大川出, 政尾亨: 地震波の位相特性とその応用に関する研究, 第 5 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 201 – 208, 1978.
- 2) 石井透, 渡辺孝英: 地震動の位相特性と地震のマグニチュード・震源距離・深さとの関係, 日本建築学会学術講演梗概集 B, 構造 I, pp. 385 – 386, 1987.
- 3) 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) 壇一男, 大崎順彦, 神田順, 岩崎良二, 政尾亨, 北田義夫: 模擬地震動作成手法に関する研究 その 5; 位相差分分布の幅をパラメータとした位相差分法の検討, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 57, pp. 595 – 596, 1982.
- 5) 壇一男, 大崎順彦, 神田順, 岩崎良二, 政尾亨, 北田義夫, 坂田光児: 模擬地震動作成手法に関する研究 その 10; 改良位相差分法による模擬地震動作成の試み, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 58, pp. 687 – 688, 1983.

- 6) 大川出：地震動の位相特性とその応用, 東京大学, 1980.
- 7) 岩崎良二, 神田順, 政尾亨, 大川出：地震動波形の位相差分および位相差分分布に関する基本的性質, 日本建築学会構造系論文報告集 (386) , pp. 16 – 23, 1988.
- 8) Papoulis, A. (1977), “Signal Analysis”, McGraw-Hill, Inc.
- 9) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 10) 大崎順彦, 神田順, 岩崎良二, 坂田光児, 北田義夫, 政尾亨：模擬地震動作成手法に関する研究 その 1；研究の動機, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 57, pp. 587 – 588, 1982.
- 11) 岡田康男, 大崎順彦, 神田順, 岩崎良二, 北田義夫, 政尾亨：：模擬地震動作成手法に関する研究 その 2；自然地震記録の非定常スペクトル特性および位相の 2 階差分について, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 57, pp. 589 – 590, 1982.
- 12) 政尾亨, 神田順, 岩崎良二, 大崎順彦, 坂田光児, 北田義夫：模擬地震動作成手法に関する研究 その 4；インパルスの位相を用いた模擬地震動作成法, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 57, pp. 593 – 594, 1982.
- 13) 神田順, 大崎順彦, 岩崎良二, 北田義夫, 政尾亨, 坂田光児：模擬地震動作成手法に関する研究 その 6；ガウス波合成法による模擬地震動作成の試み, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 57, pp. 597 – 598, 1982.
- 14) 奈良岡浩二, 神田順, 岩崎良二, 政尾亨, 坂田光児, 北田義夫, 大崎順彦：模擬地震動作成手法に関する研究 その 7；自然地震記録の非定常スペクトルを用いた作成手法, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 58, pp. 681 – 682, 1983.
- 15) 北田義夫, 神田順, 岩崎良二, 政尾亨, 坂田光児, 大崎順彦：模擬地震動作成手法に関する研究 その 8；ビート波合成法による模擬地震動作成の試み, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 58, pp. 683 – 684, 1983.

- 16) 渡辺孝英, 大崎順彦, 神田順, 岩崎良二, 政尾亨, 北田義夫, 坂田光児 : 模擬地震動作成手法に関する研究 その 9 ; 自然地震記録の狭帯域の位相差分分布と包絡形について, 日本建築学会学術講演梗概集 構造系 58, pp. 685 – 686, 1983.
- 17) 政尾亨, 坂田光児, 神田順, 岩崎良二, 北田義夫, 大崎順彦 : 模擬地震動作成手法に関する研究 その 11 ; 代数関数の位相を用いた模擬波の応答性状について, 日本建築学会学術講演梗概集構造系 58, pp. 689 – 690, 1983.
- 18) 坂田光児, 政尾亨, 神田順, 岩崎良二, 北田義夫, 大崎順彦 : 模擬地震動作成手法に関する研究 その 12 ; 代数関数 (指数関数) の位相による模擬地震動作成例, 日本建築学会学術講演梗概集構造系 58, pp. 691 – 692, 1983.
- 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 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.
- 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 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.
- 21) 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.
- 22) 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 5 水平動との相関関係に基づいた鉛直動作成手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 609 号, pp. 31 – 40, 2006.

- 23) 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 6
Love 波に関する模擬地震動作成手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 622 号, pp. 73 – 82,
2007.

2. $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ の特性

本章では, 1.6 節で挙げた地震それぞれについて, 観測波形から位相差分を算出し, そこから σ , β_3 , β_4 を計算した. 本論文内では σ と β_3 , σ と β_4 および β_3 と β_4 の関係性を調べた.

2.1 全周波数帯域における結果

本節ではまずノイズをそれほど含まず, かつ構造物の振動に重要な意味合いを持つと思われる周波数帯域 0.1 – 10.0 Hz に着目し, そこに各波形の 0.1 – 10.0 Hz に含まれる位相差分から σ , β_3 , β_4 を計算し, 全周波数帯域における位相差分の統計量とした. (なお著者は今回解析に用いた波形の中から 100 波以上を選び出し, フーリエ振幅の形状から帯域 0.1 – 10.0 Hz にはそれほどノイズが含まれていないと判断した.) 1.6 節の Table.1.1 に挙げられた 13 個の地震それぞれについての検討結果を Fig.2.1 から Fig.2.13 に示す. 計算に用いた Fortan 77 のプログラムを Appendix.A の A.1 に示す. このプログラムは大崎 (1994)¹⁾ に示された FAST.f と共にコンパイルした後で使用出来る.

それぞれの地震における σ と β_3 の関係を見ると, 地震の規模や発生メカニズムによらず同様の形状を持つ散布図が得られていることが分かる. これらの図から以下の傾向を見て取れる.

ア) β_3 は正負両方の値を同程度の頻度で取る

イ) σ が小さくなるに従って β_3 の絶対値は大きくなる

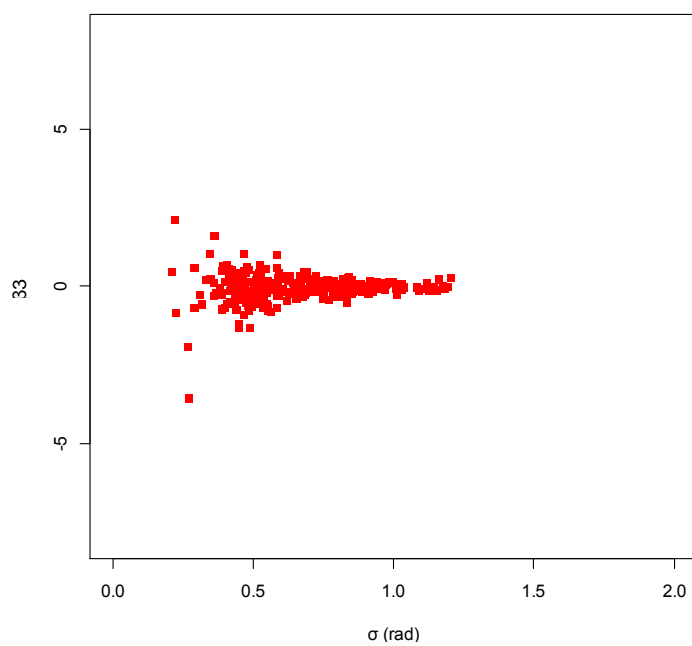
続いて σ と β_4 の関係を見ると地震の違いに関わらず次のような傾向を見て取れる.

ウ) σ が小さくなるに従って β_4 は非線形的に大きくなる

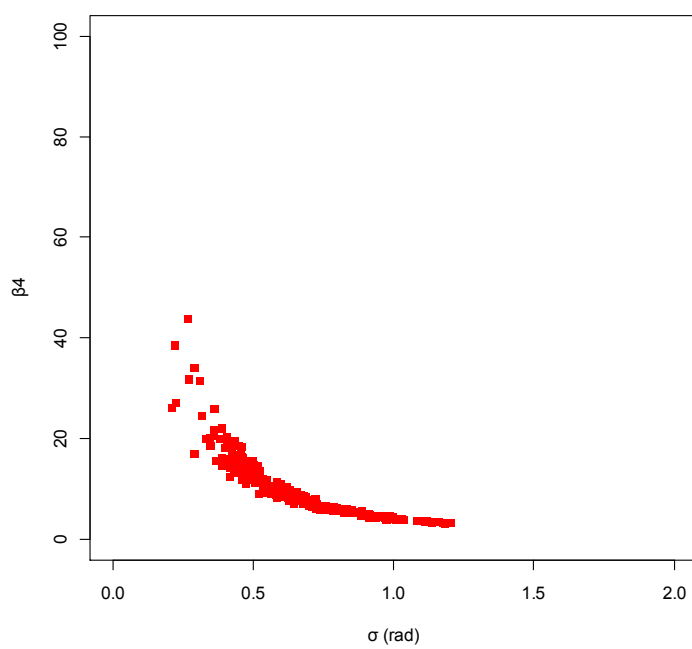
そして β_3 と β_4 の関係性については

エ) β_3 が 0 付近では β_4 は小さいが, β_3 が 0 から離れるにつれて β_4 は発散していく

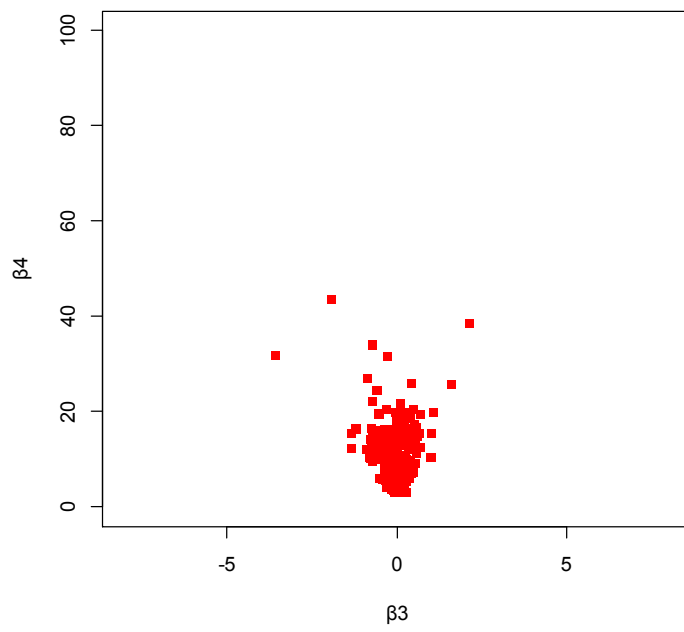
という傾向を見て取れる.



a) σ - β_3 relation

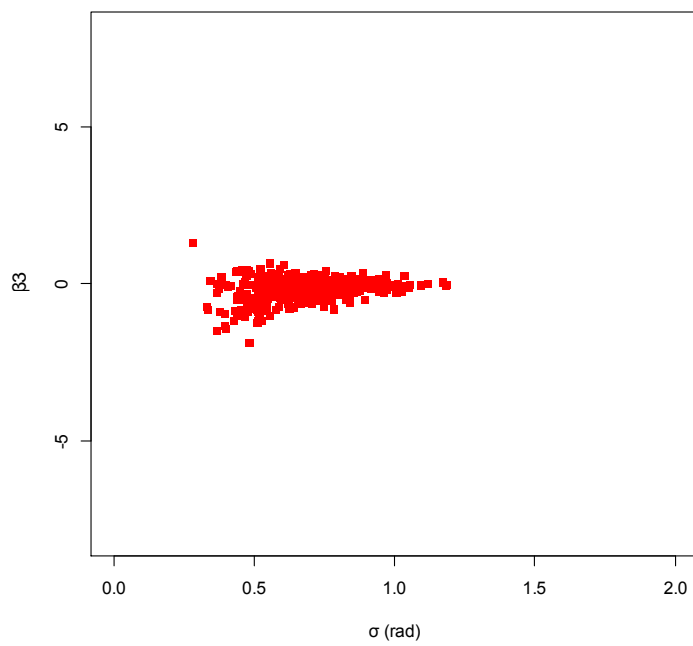


b) σ - β_4 relation

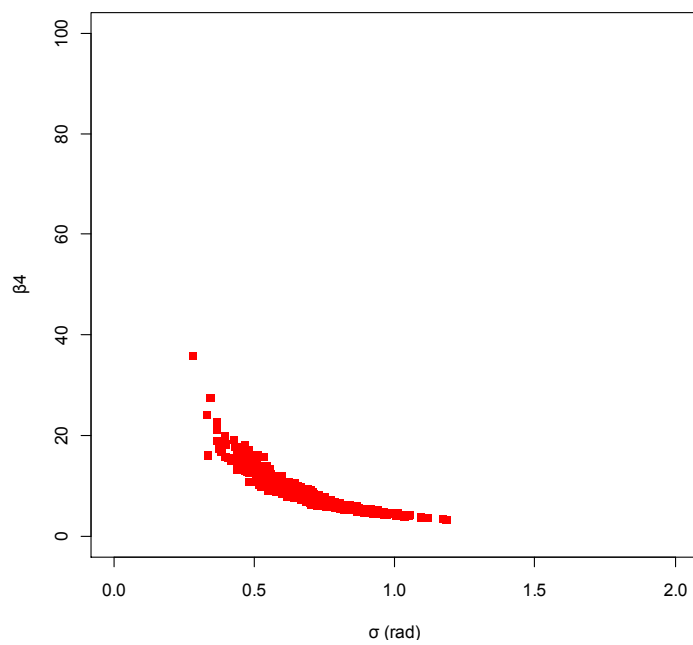


c) β_3 - β_4 relation

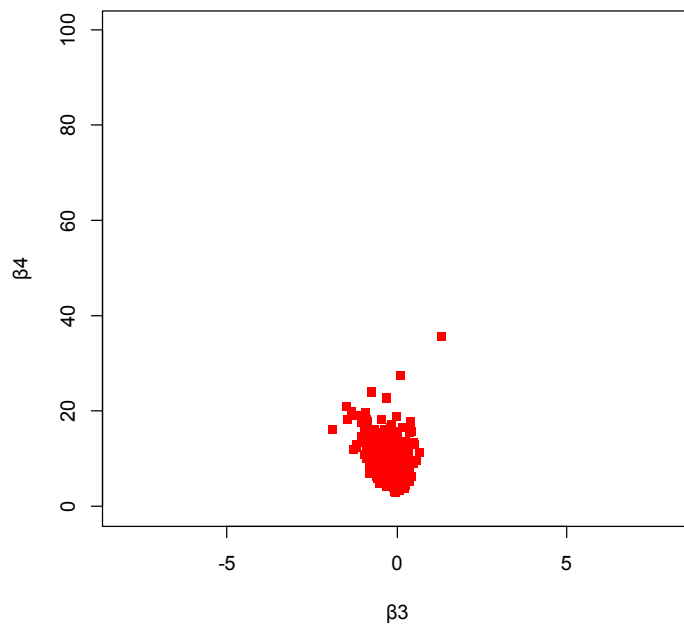
Fig.2.1: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2000 Tottoriken seibu earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

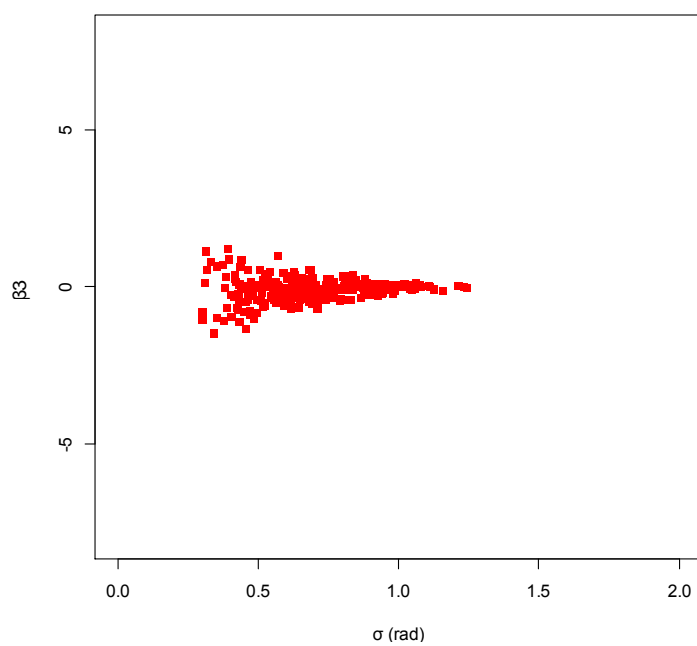


b) σ - β_4 relation

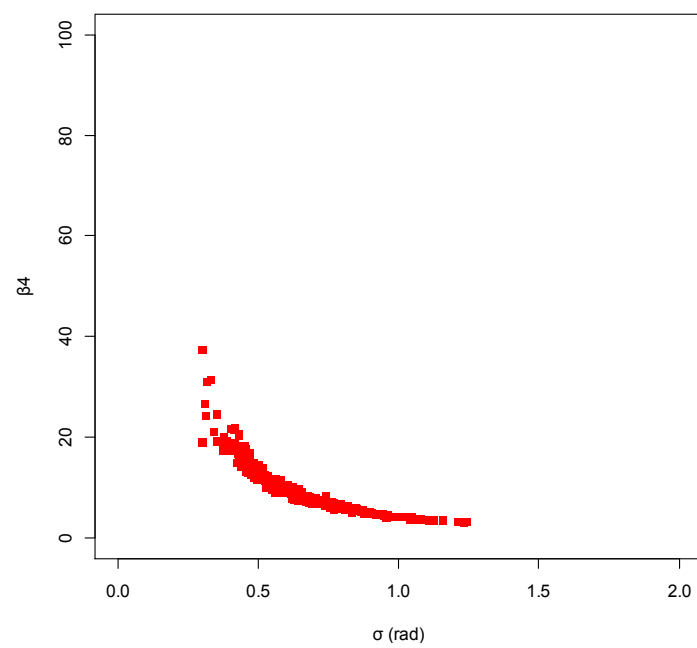


c) β_3 - β_4 relation

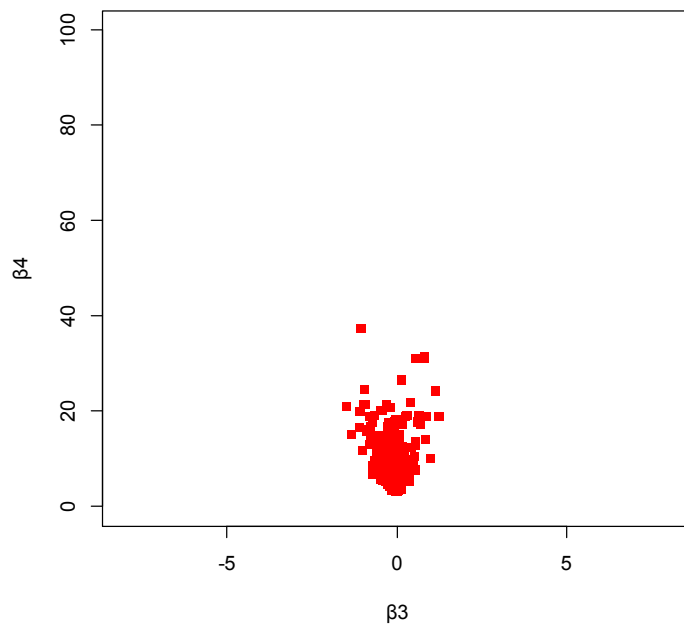
Fig.2.2: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2004 Niigataken chuetsu earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

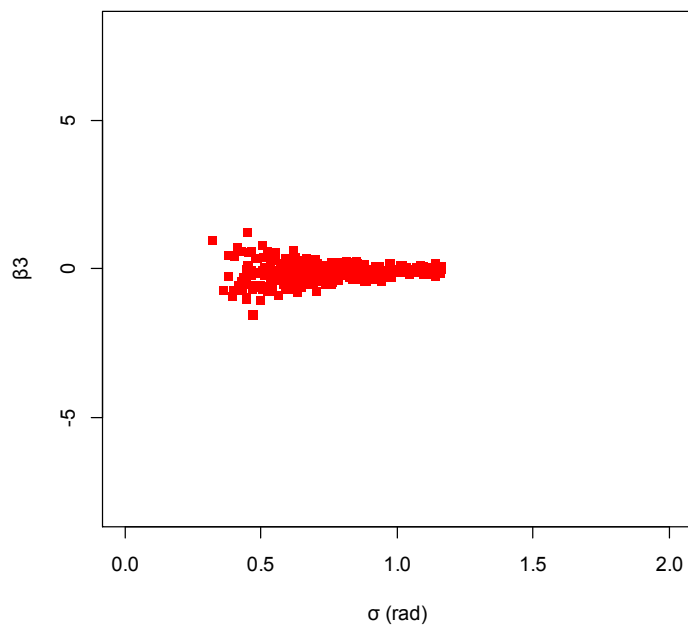


b) σ - β_4 relation

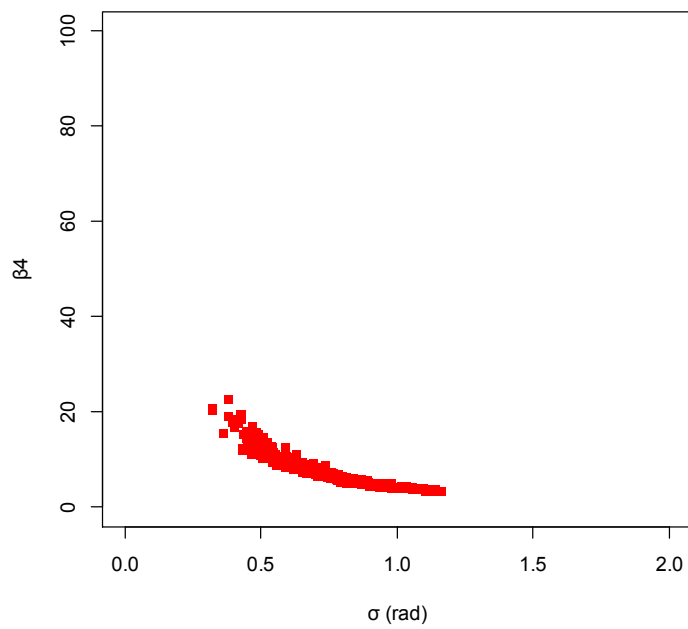


c) β_3 - β_4 relation

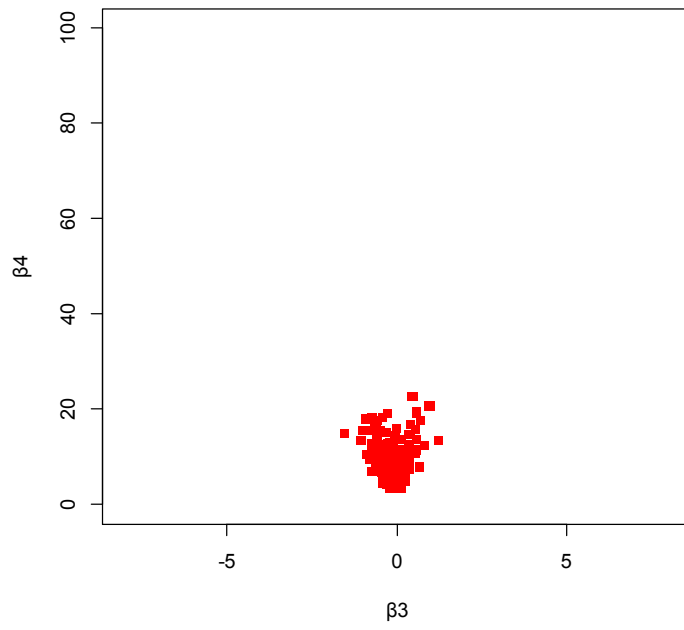
Fig.2.3: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Fukuokaken seihouoki earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

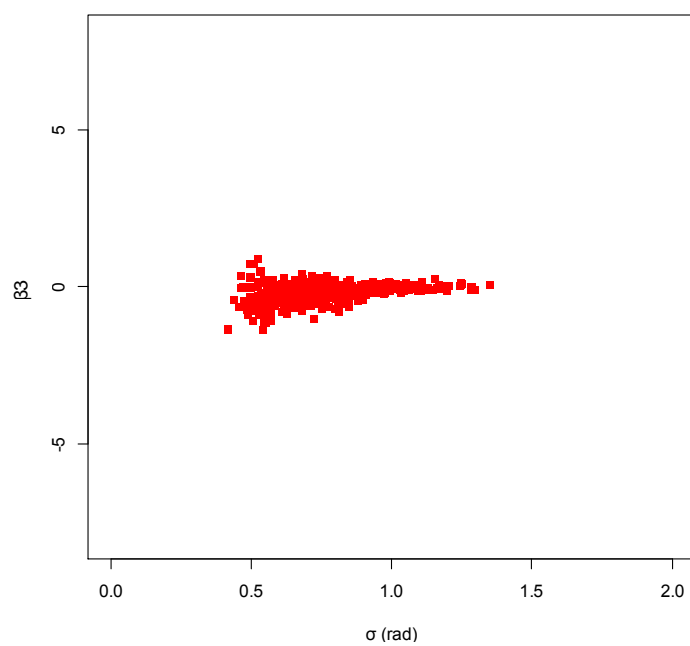


b) σ - β_4 relation

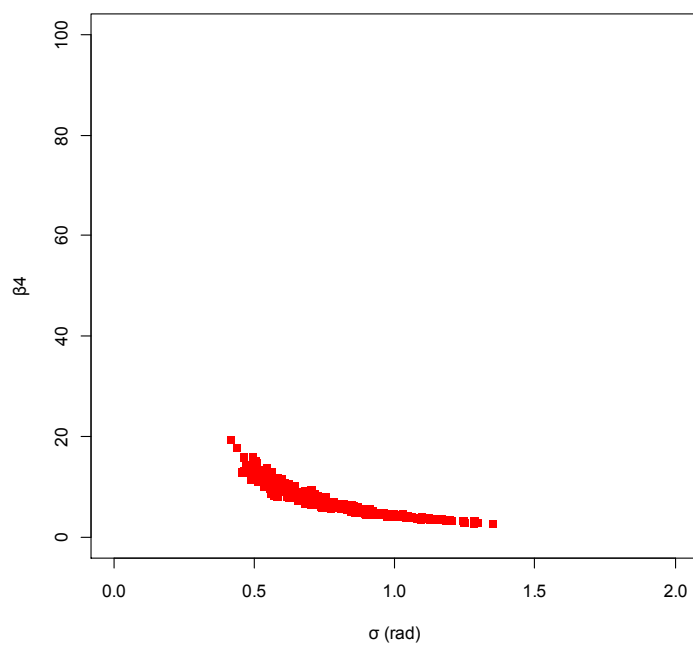


c) β_3 - β_4 relation

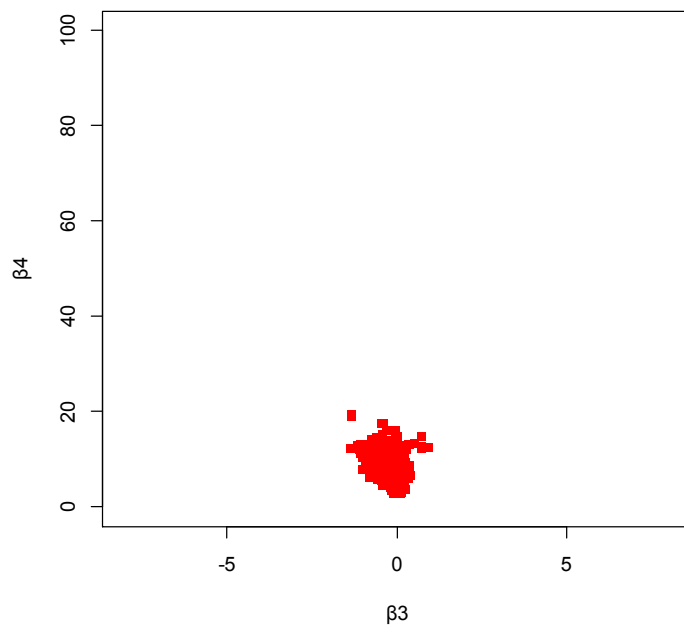
Fig.2.4: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Notohanto oki earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

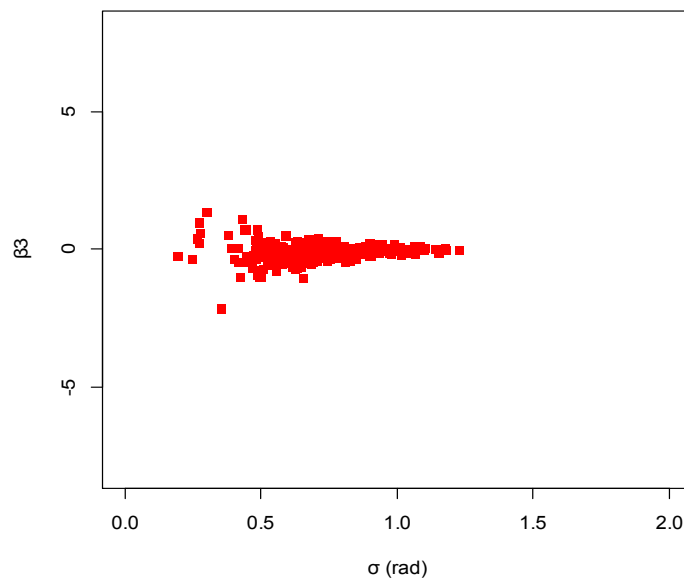


b) σ - β_4 relation

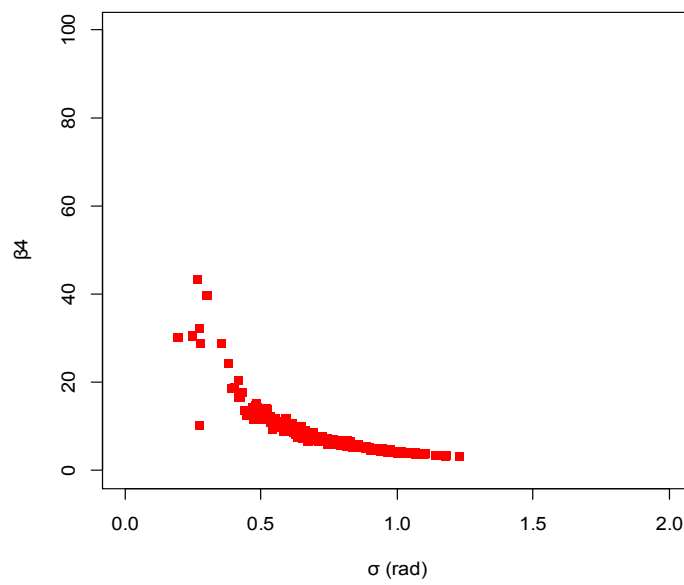


c) β_3 - β_4 relation

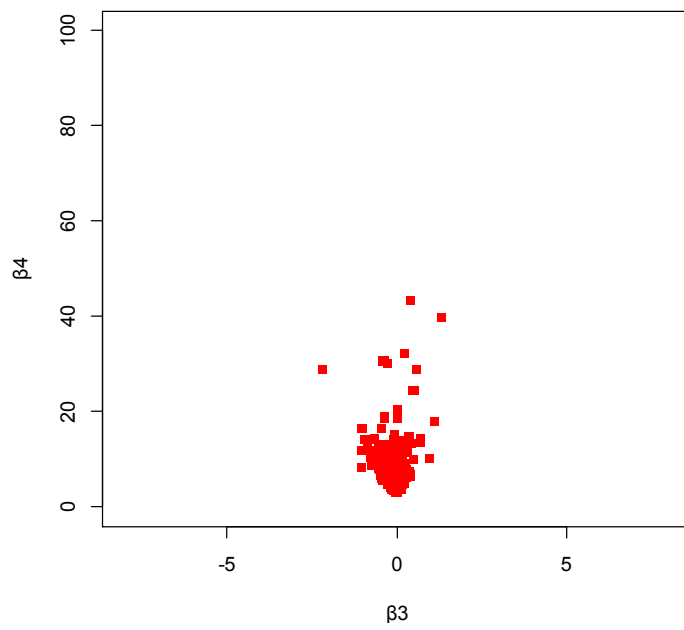
Fig.2.5: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Niigataken chuetsuoki earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

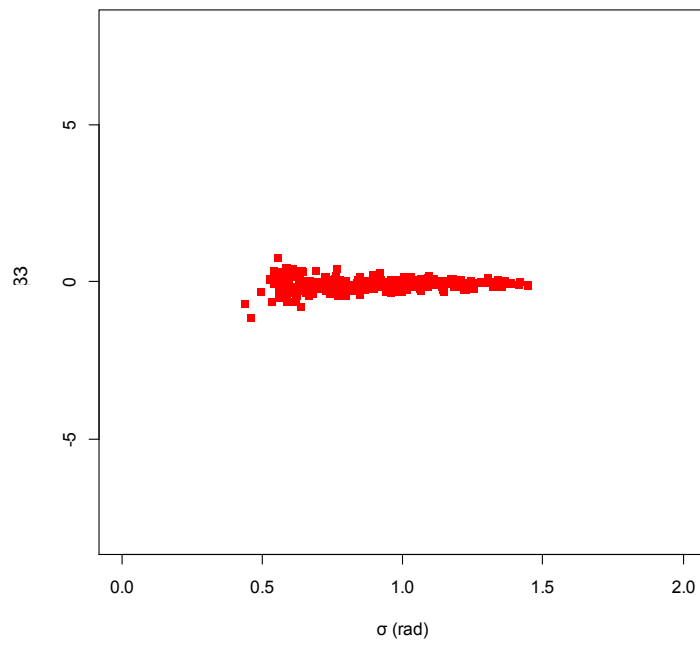


b) σ - β_4 relation

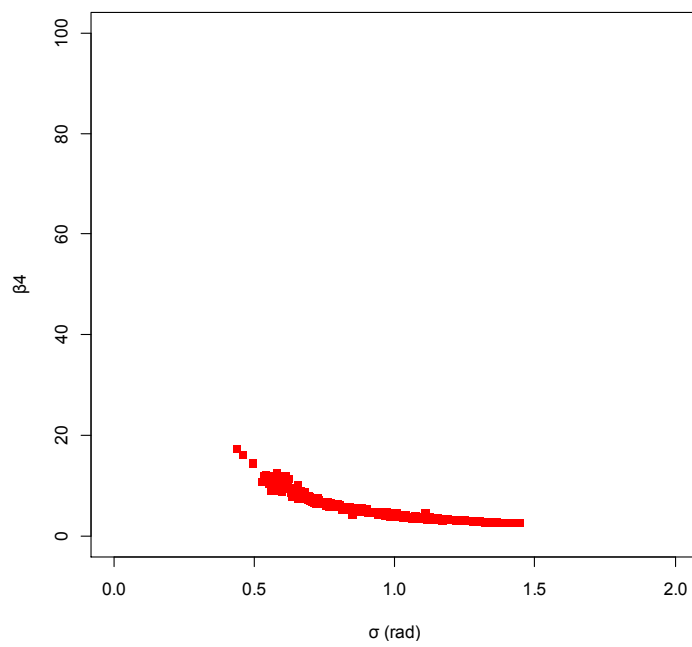


c) β_3 - β_4 relation

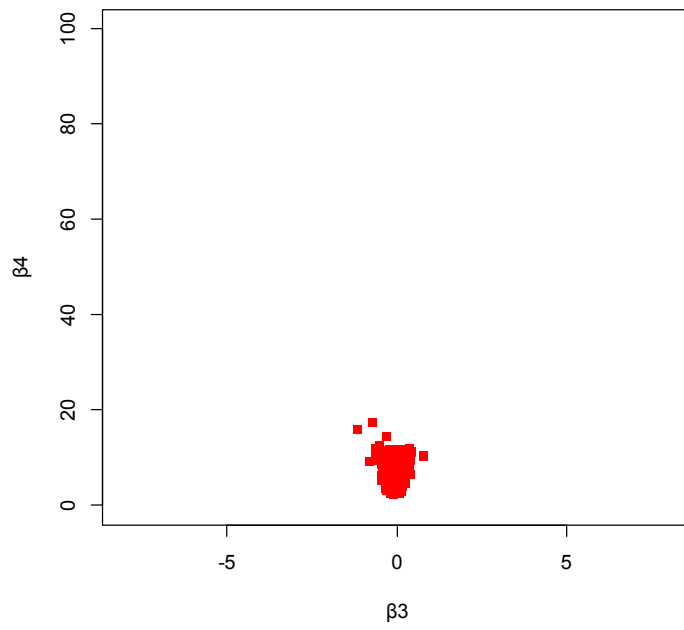
Fig.2.6: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2008 Iwate – Miyagi nairiku earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

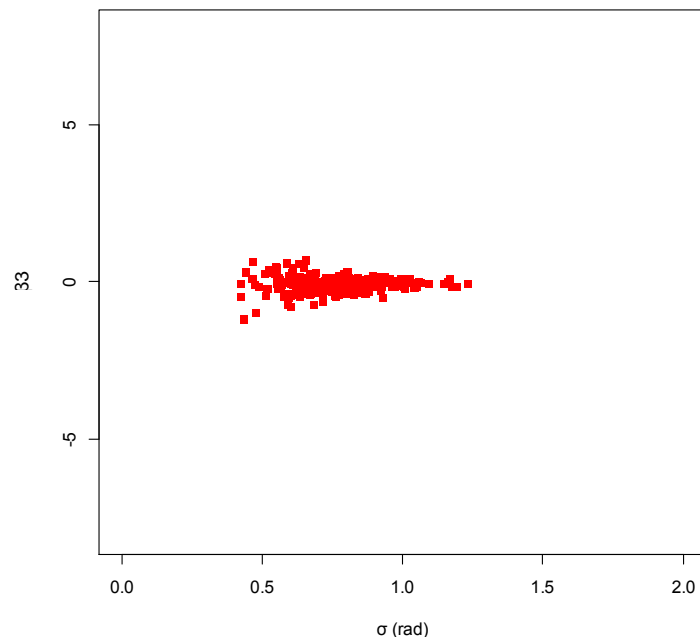


b) σ - β_4 relation

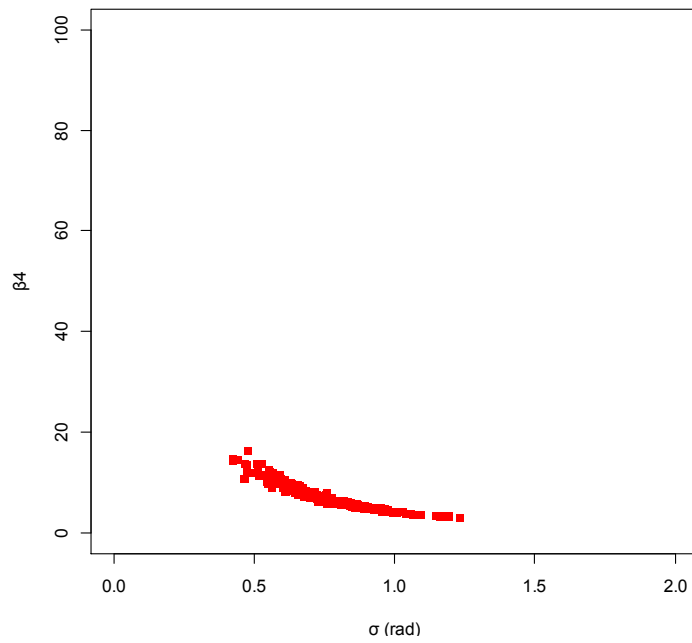


c) β_3 - β_4 relation

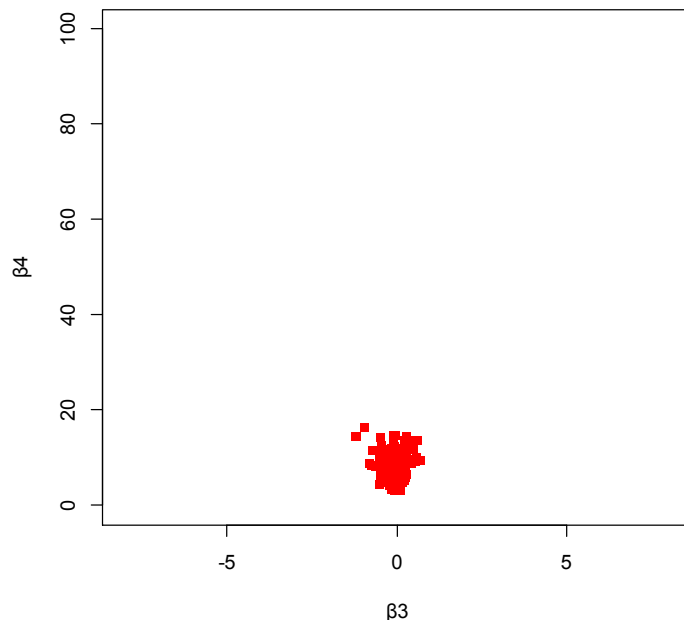
Fig.2.7: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Tokachi oki earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

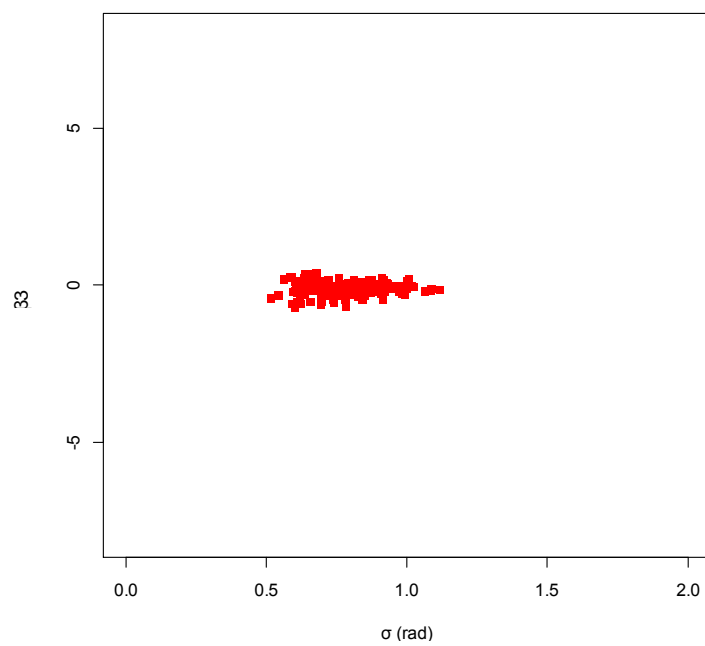


b) σ - β_4 relation

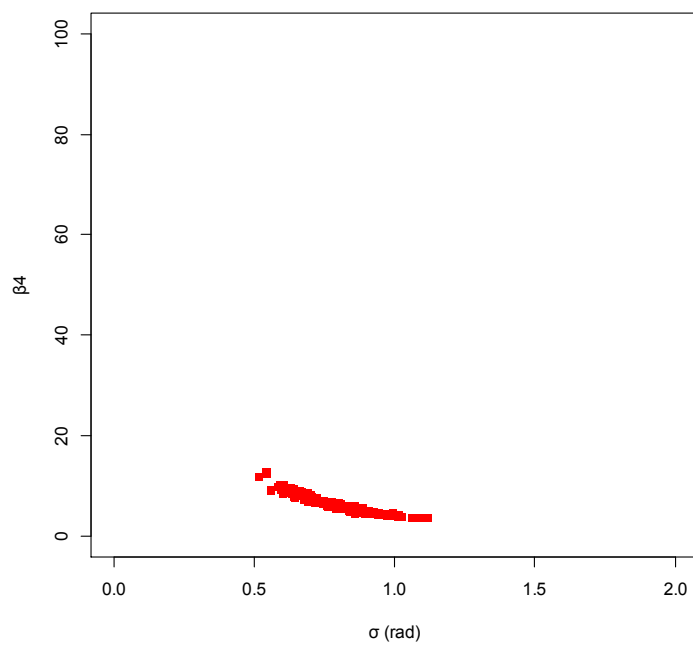


c) β_3 - β_4 relation

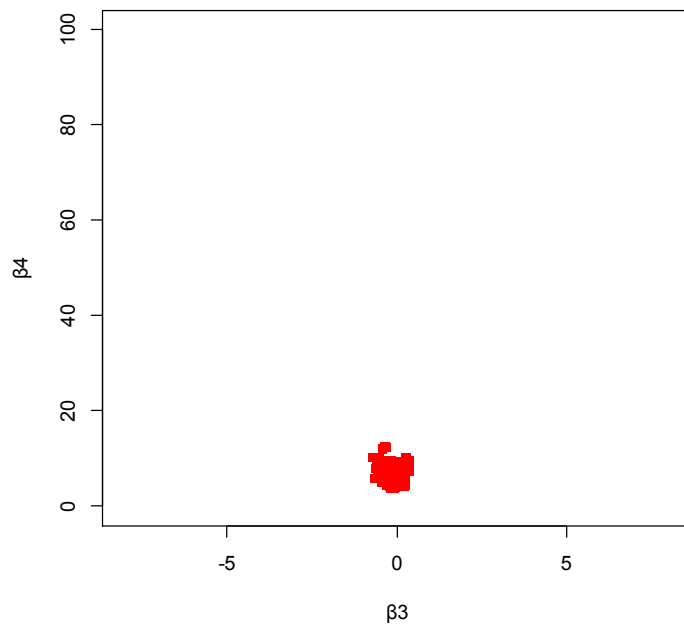
Fig.2.8: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Miagiken oki earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

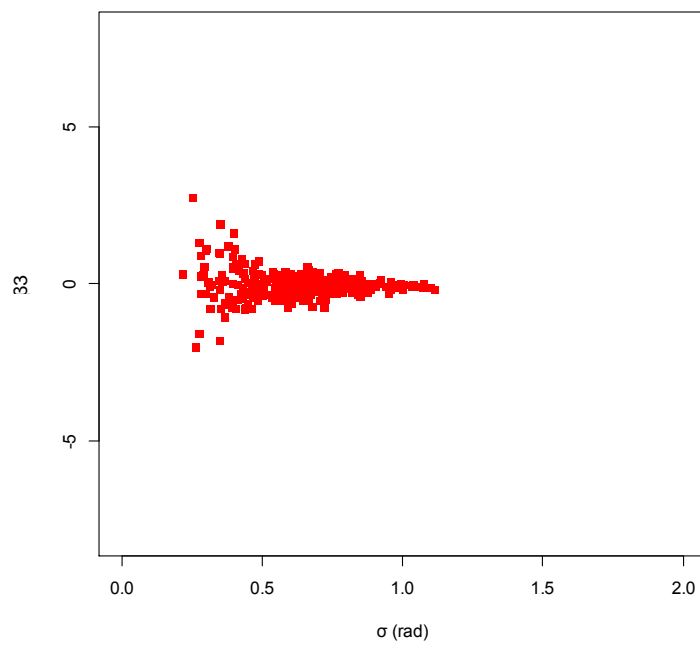


b) σ - β_4 relation

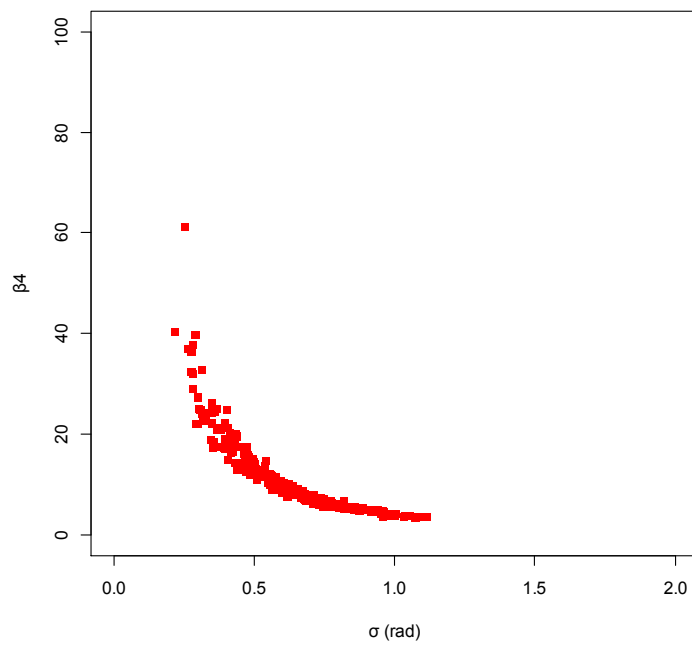


c) β_3 - β_4 relation

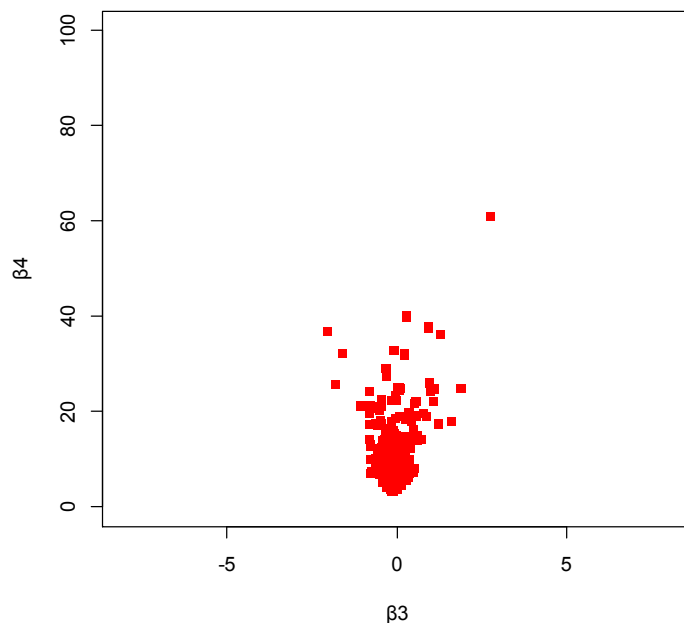
Fig.2.9: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2011 Sanriku oki earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

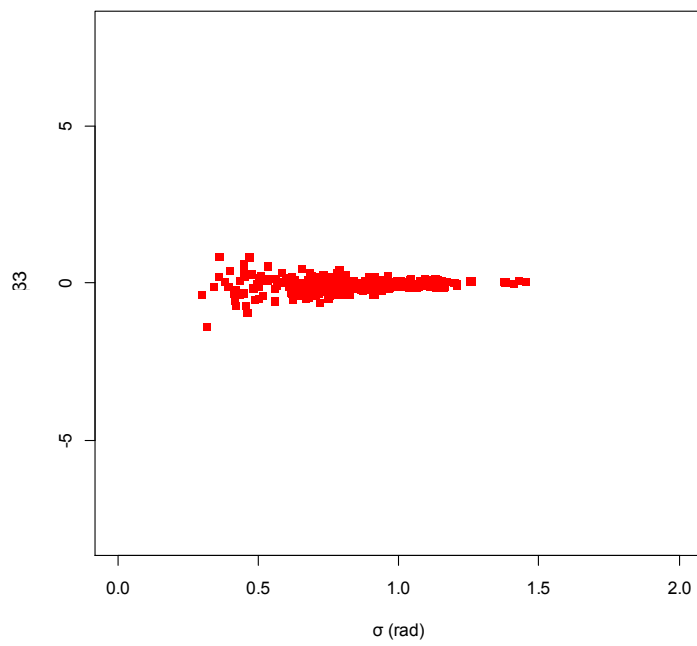


b) σ - β_4 relation

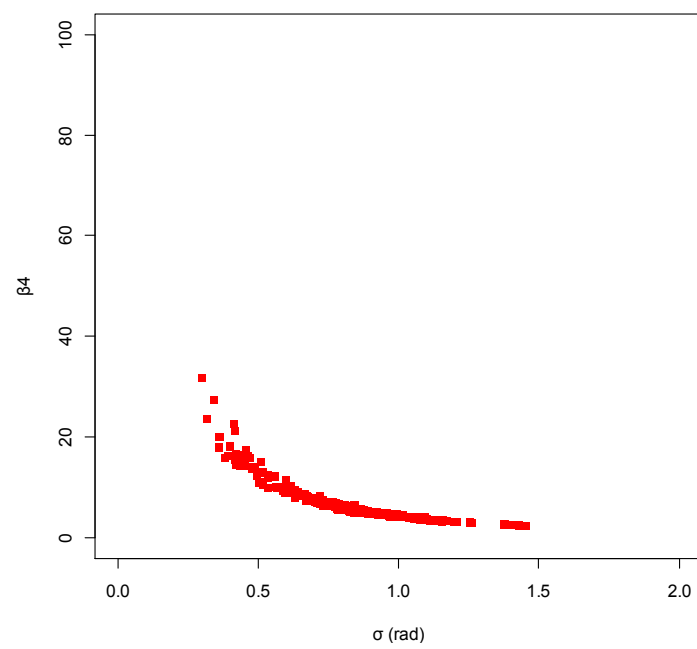


c) β_3 - β_4 relation

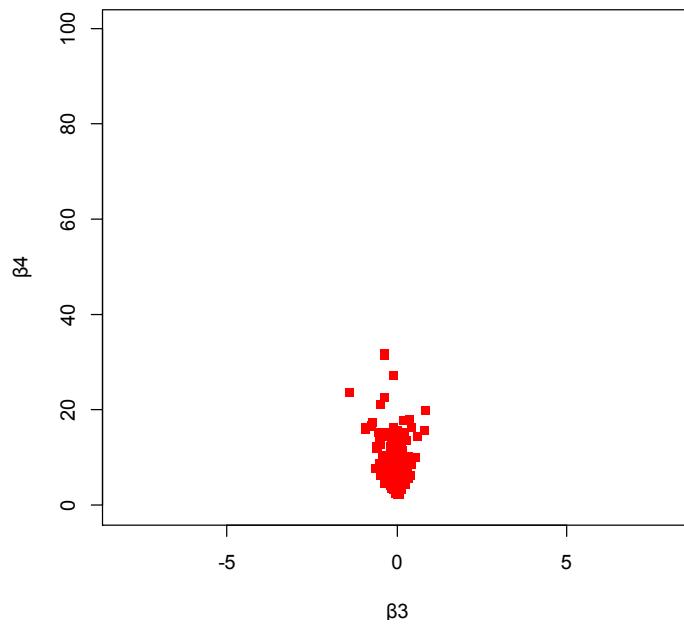
Fig.2.10: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Geiyo earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

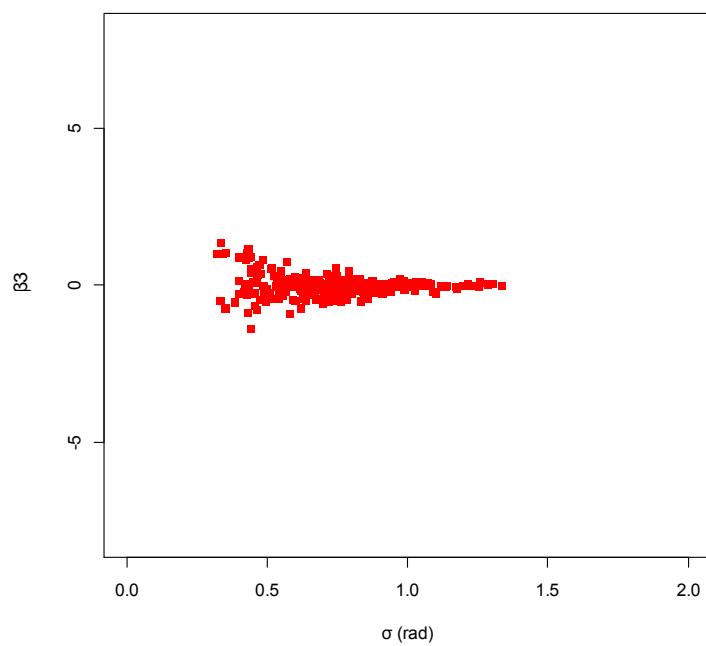


b) σ - β_4 relation

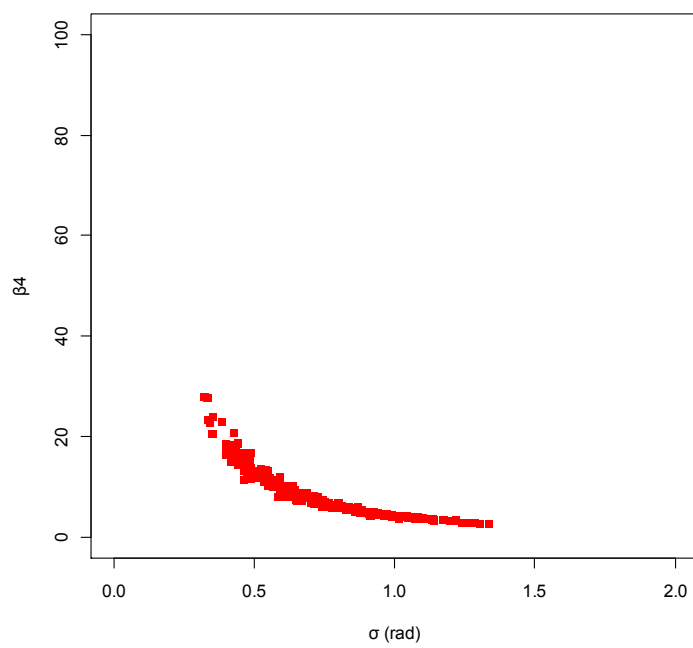


c) β_3 - β_4 relation

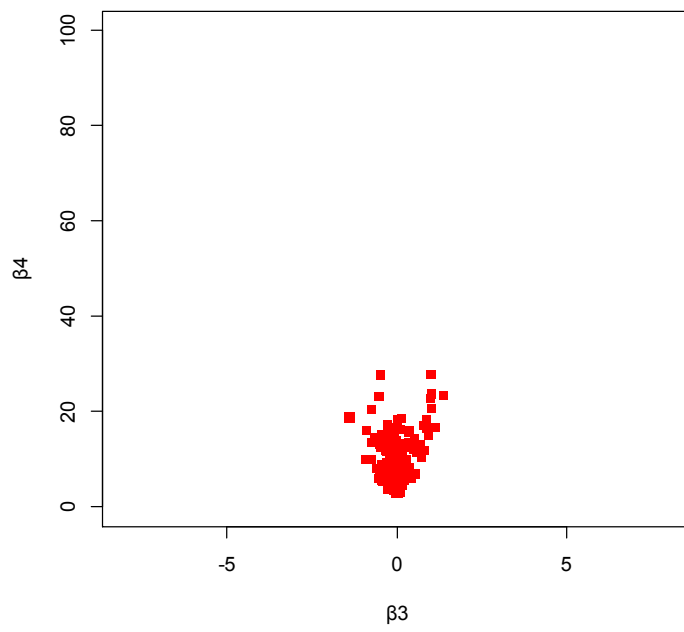
Fig.2.11: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Iwateken nairikunanbu earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation

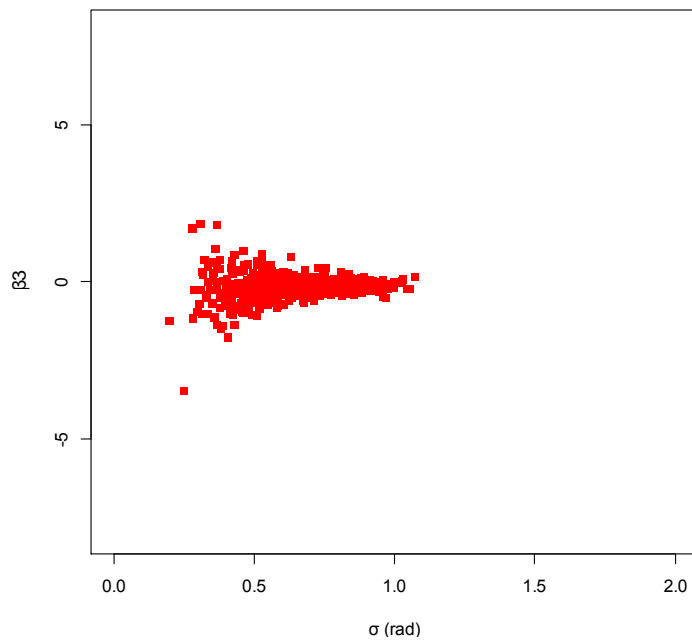


b) σ - β_4 relation

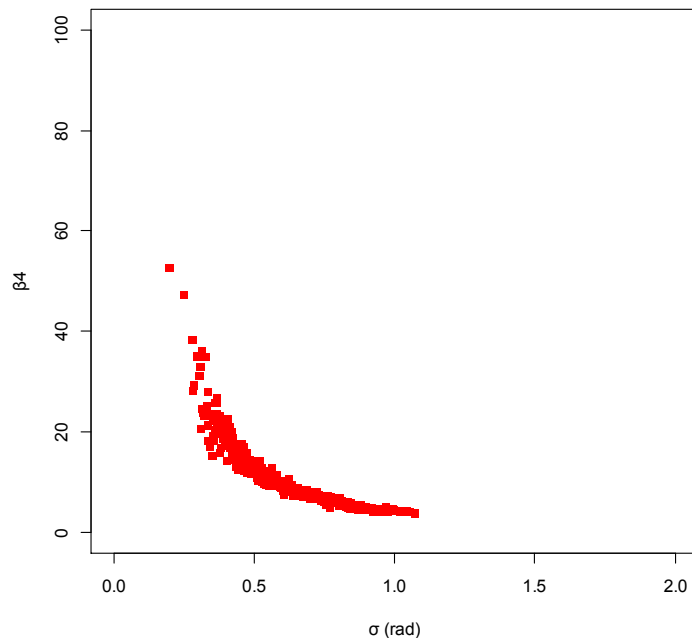


c) β_3 - β_4 relation

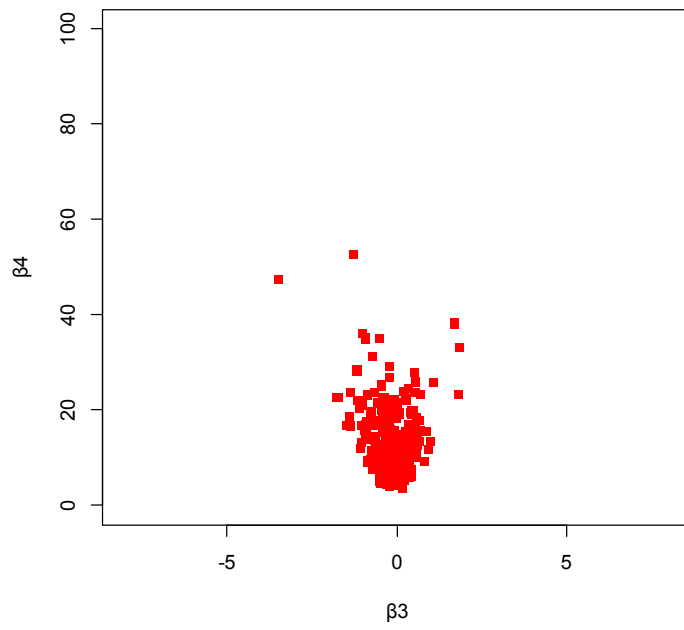
Fig.2.12: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Miyagiken oki earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.2.13: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2009 Surugawan earthquake in 0.1 – 10.0 Hz band

2.2 帯域における結果

2.1 節で帯域 0.1–10.0 Hz では σ と β_3 , σ と β_4 および β_3 と β_4 の間にそれぞれ関係性が見られると指摘した. しかし実際の構造物には原子力発電所のように固有周波数が高いものから, 高層ビルのように固有周波数が低いものまで様々な種類がある. そのため 0.1–10.0 Hz よりも細かい周波数帯域での検討が必要である. しかし低周波数帯において帯域を細かく分割しすぎると, 含まれる位相差分の数が少なくなり本論文内で議論する β_3 と β_4 の算出には適さない. 著者は含まれる位相差分の数にも注意しながら次のように 5 つの帯域を定義した.

0.1 – 1.0 Hz (N = 149)

1.0 – 2.0 Hz (N = 164)

2.0 – 3.0 Hz (N = 164)

3.0 – 5.0 Hz (N = 327)

5.0 – 10.0 Hz (N = 819)

帯域の後ろにある両括弧内には, それぞれの帯域に含まれる位相差分のデータ数が示されている. 0.1–1.0Hz, 1.0–2.0 Hz, 2.0–3.0 Hz に含まれる位相差分のデータ数はそれぞれ 149, 164, 164 個と類似している. 一方, 3.0–5.0 Hz, 5.0–10.0 Hz は逆数を取って固有周期として, 短い周期から並べると 0.1–0.2 s, 0.2–0.33 s となり, 周期で見た時の間隔は 0.1 秒と 0.133 秒というように類似している.

各地震について, 上で定義した 5 つの狭帯域における位相差分の σ , β_3 , β_4 を計算し 2.1 節と同様にそれぞれの関係性を調べた. 各地震についての結果を地震毎に Fig.2.14 から Fig.2.26 に示す. また計算に用いた Fortran 77 のプログラムを Appendix.A の A.2 に示す. (プログラムは FAST.f と共にコンパイルした後に使用出来る.)

σ と β_3 の関係から地震の規模や発生のメカニズムによらず次のような傾向を見て取れる.

ア) β_3 は正負両方の値を同程度の頻度で取る

イ) σ が小さくなるに従って β_3 の絶対値は大きくなる

ウ) 0.1–1.0 Hz など含まれるデータ数が少ない帯域における β_3 の絶対値は, データ数を最も

多く含む 5.0–10.0 Hz における β_3 の絶対値より大きい

一方で, σ と β_4 については以下のような傾向が見られる.

エ) σ が小さくなるに従って β_4 は大きくなる

オ) σ が 0.4 程度以下のもとでは β_4 が大きいケースと小さいケースがある

そして β_3 と β_4 の間には次のような傾向が認められた.

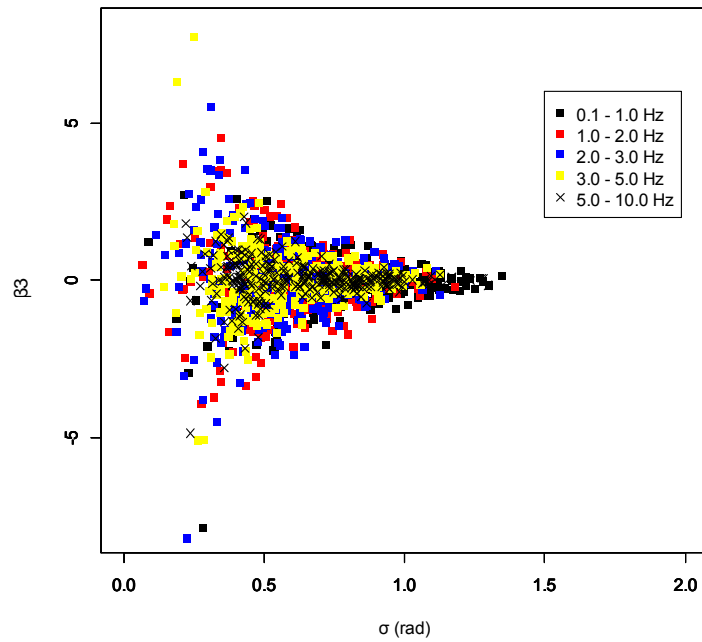
カ) β_3 が 0 近辺ではどの帯域においても β_4 は小さい

キ) β_3 が 0 を離れると β_4 は発散する

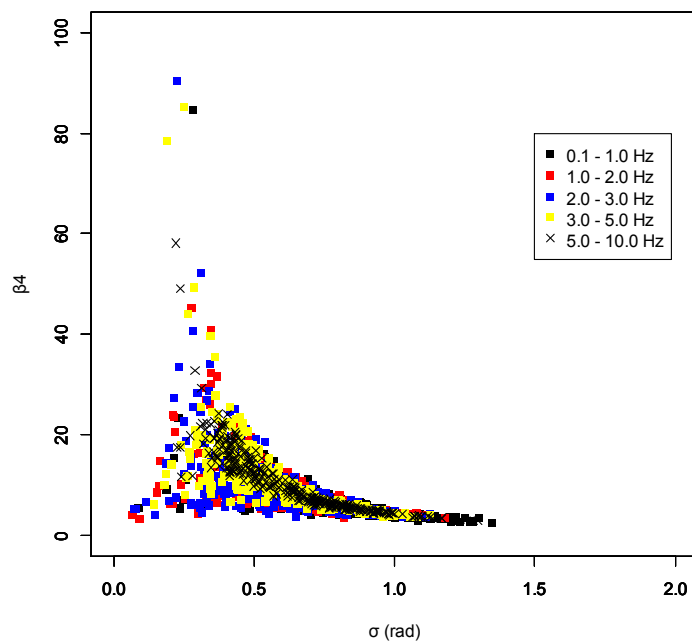
ク) 0.1 – 1.0 Hz など含まれるデータ数が少ない帯域では β_3 の絶対値は大きく, 対応する β_4 も大きい

さらに地震毎の違いを見たところ, 2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震の 0.1 – 1.0 Hz における σ は, 他の地震の 0.1 – 1.0 Hz における σ に比べて大きかった.

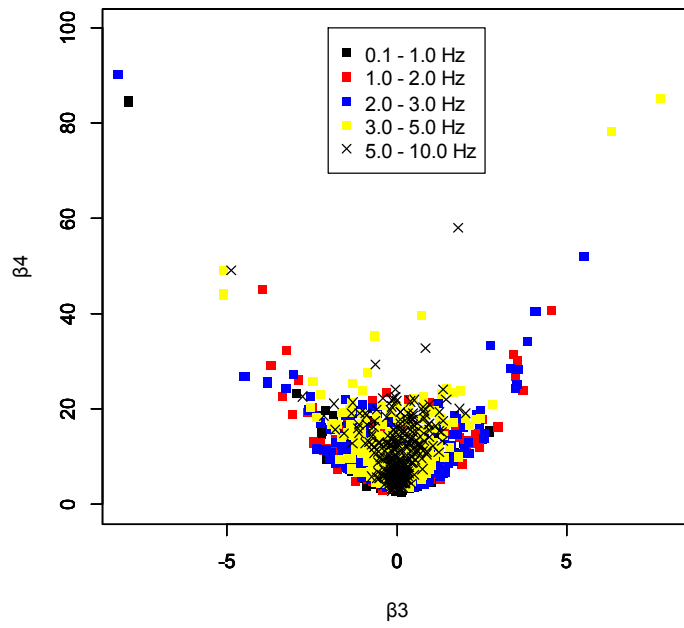
ところで β_3 , β_4 はどのようなケースにおいて大きな値になりうるのか説明する. Fig.2.27 に μ と σ はそれほど変わらないが β_3 と β_4 が大きく異なる二つの位相差分分布を示す. Fig.2.27.a, Fig.2.27.b に示された二つの分布両方について, 左側に見えるピークを含んだ大きな塊 - 「山」 - の形状はほとんど変わらないと分かる. それにも関わらず β_3 と β_4 が大きく異なるのは楕円で囲んだ, 平均 μ から離れた少数のデータの値と個数が高次モーメントである β_3 と β_4 に大きなインパクトを与えているためと推察される.



a) σ - β_3 relation

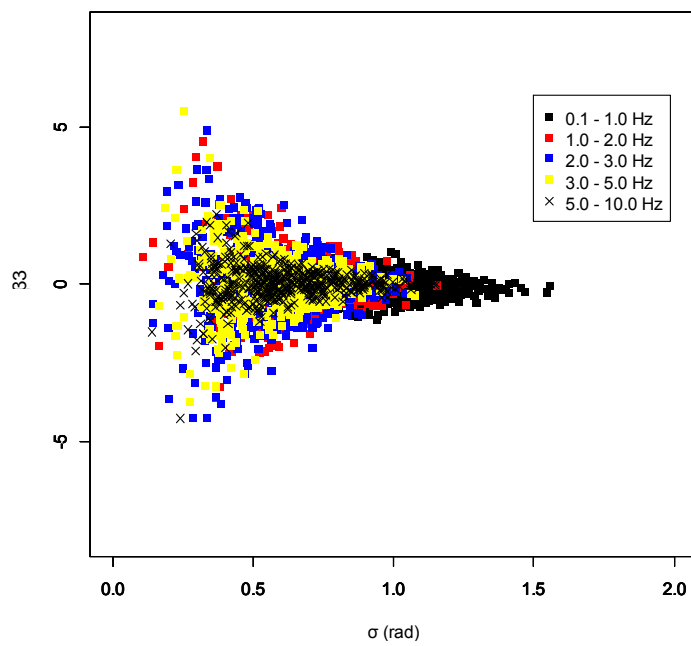


b) σ - β_4 relation

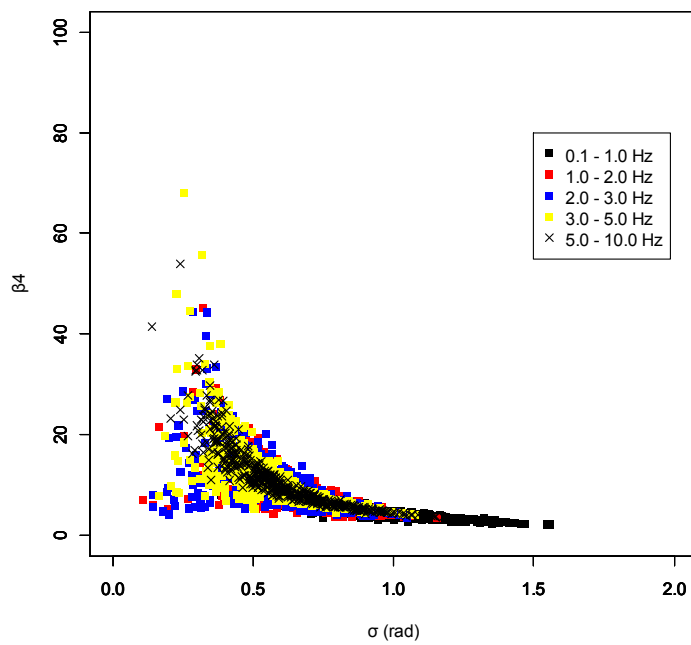


c) β_3 - β_4 relation

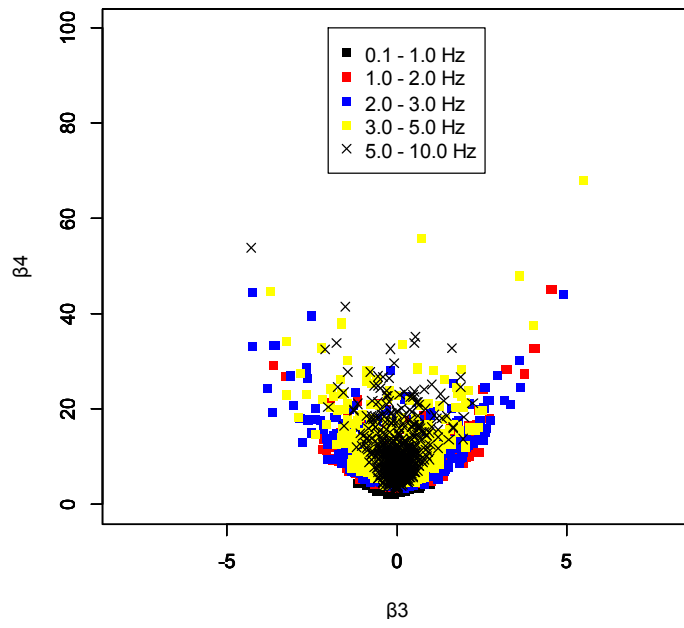
Fig.2.14: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2000 Tottoriken seibu earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

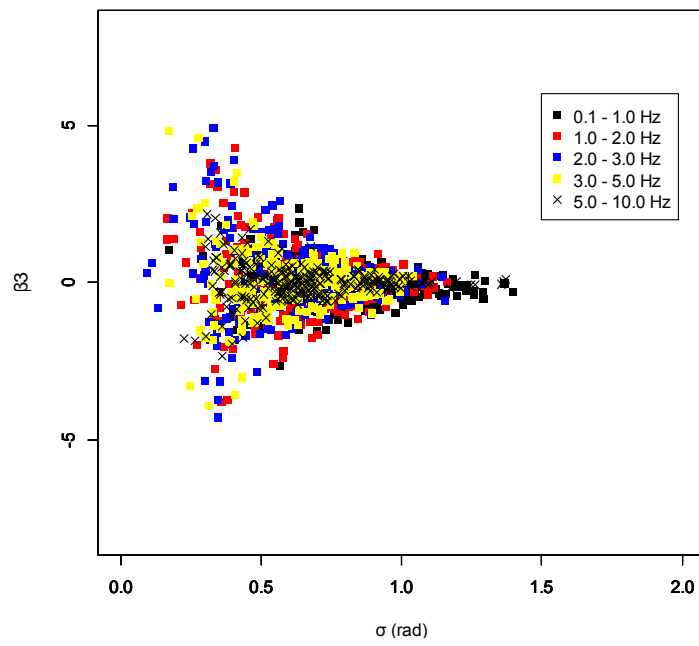


b) σ - β_4 relation

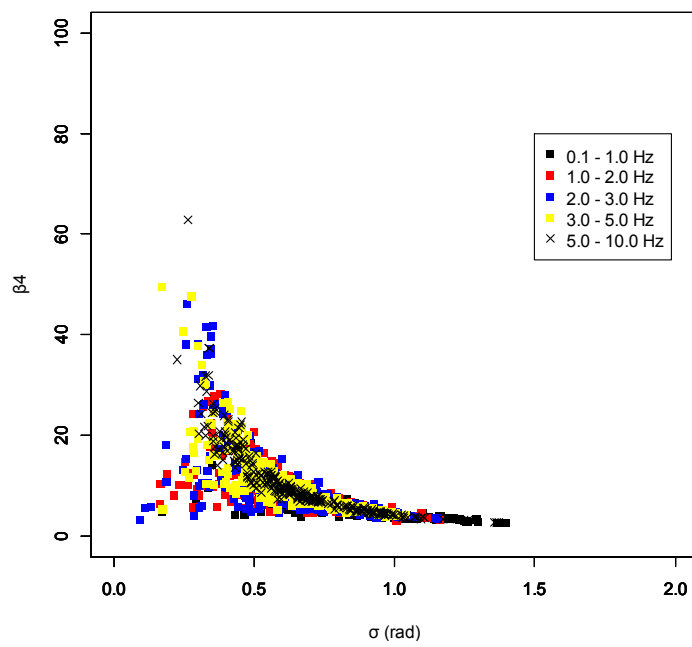


c) β_3 - β_4 relation

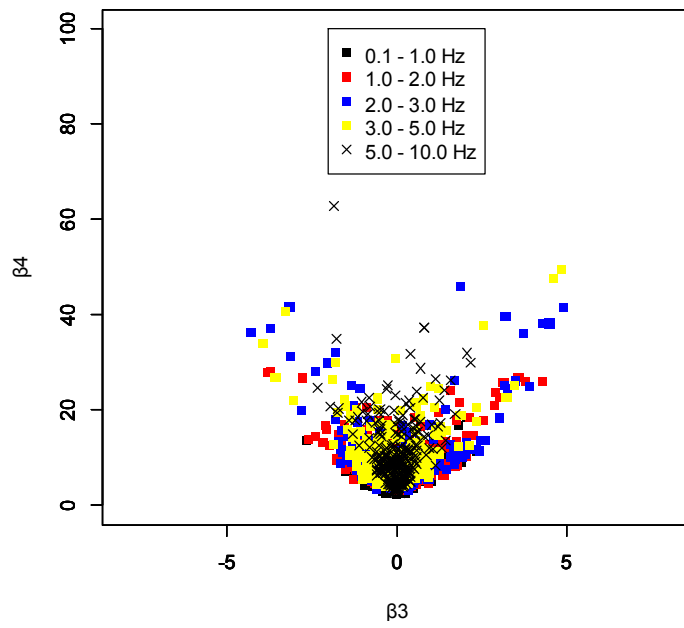
Fig.2.15: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2004 Niigataken chuetsu earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

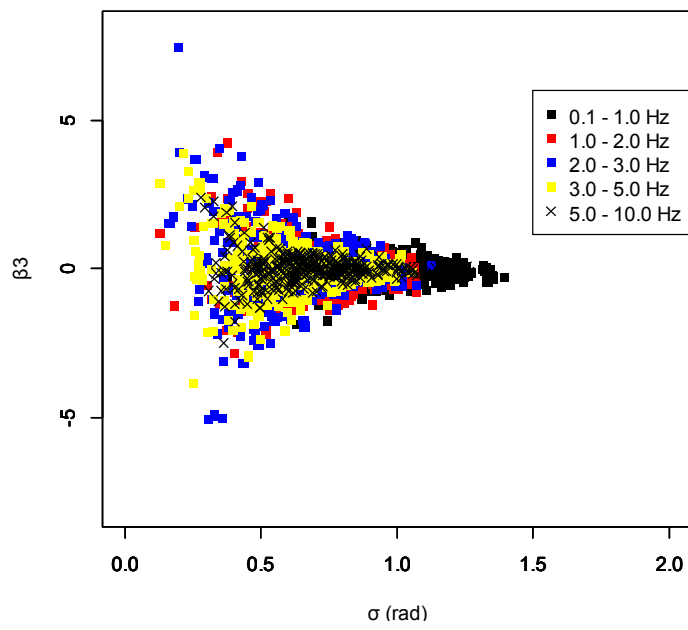


b) σ - β_4 relation

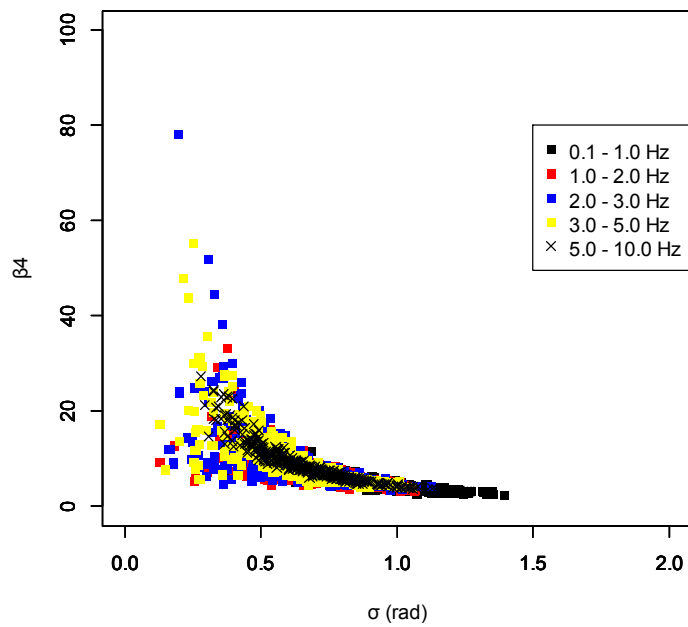


c) β_3 - β_4 relation

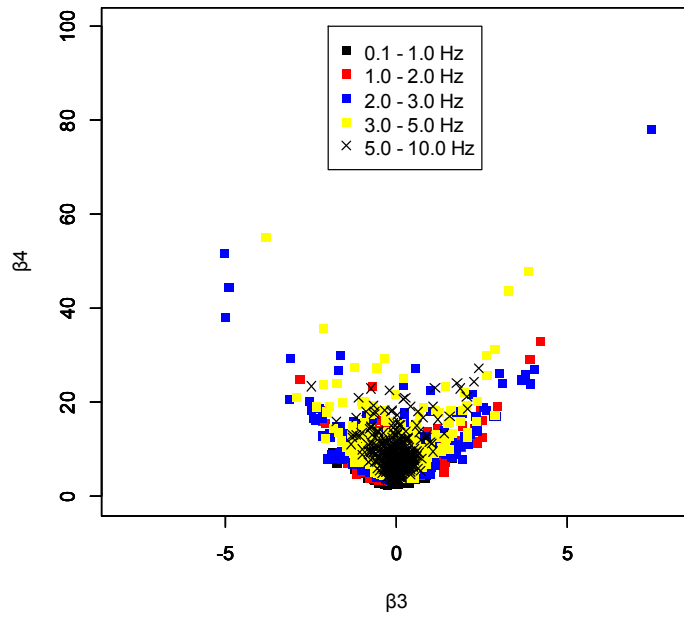
Fig.2.16: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Fukuokaken seihouoki earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

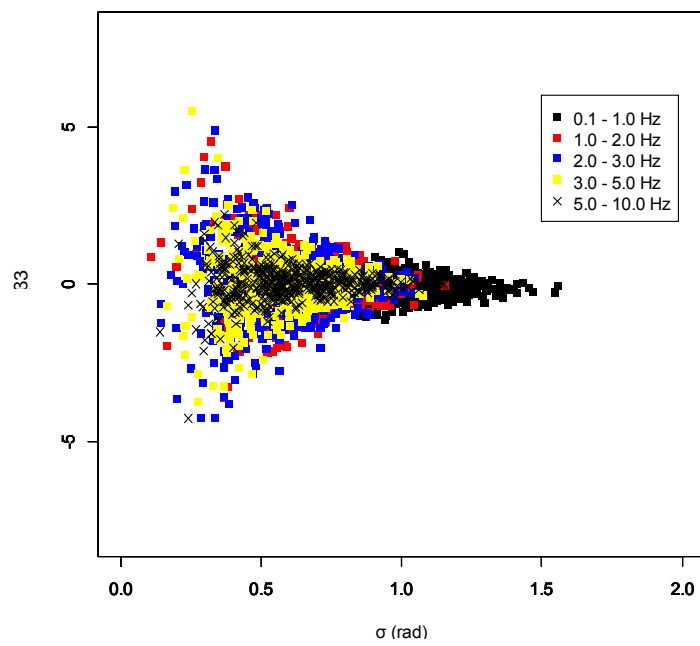


b) σ - β_4 relation

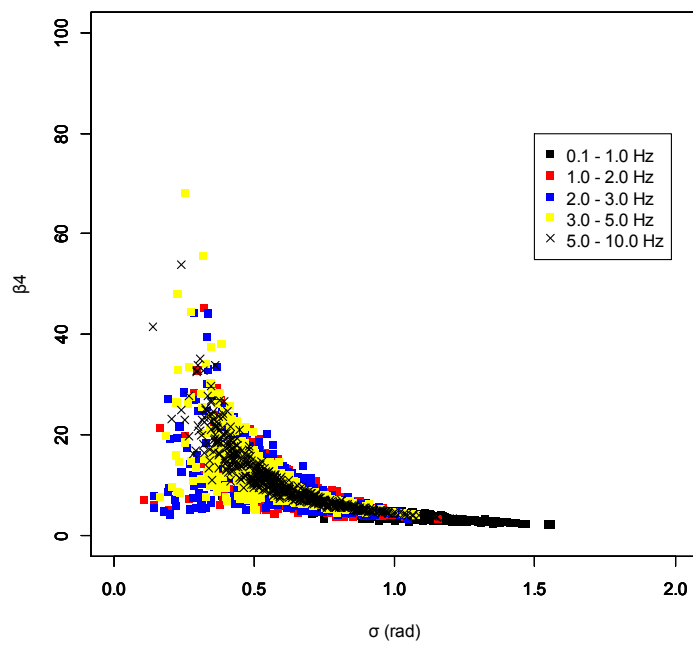


c) β_3 - β_4 relation

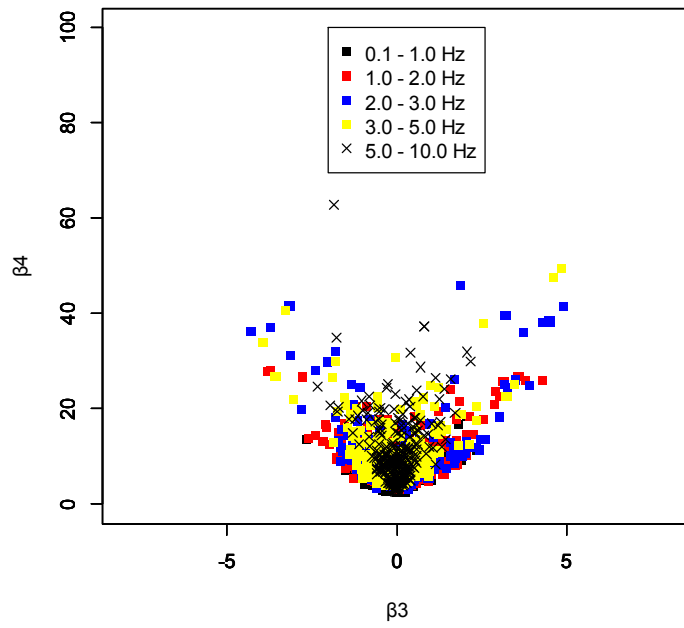
Fig.2.17: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Notohanto oki earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

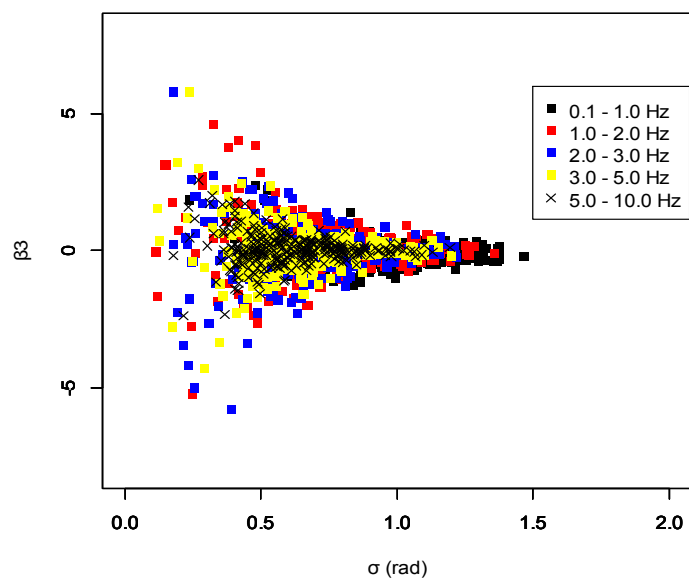


b) σ - β_4 relation

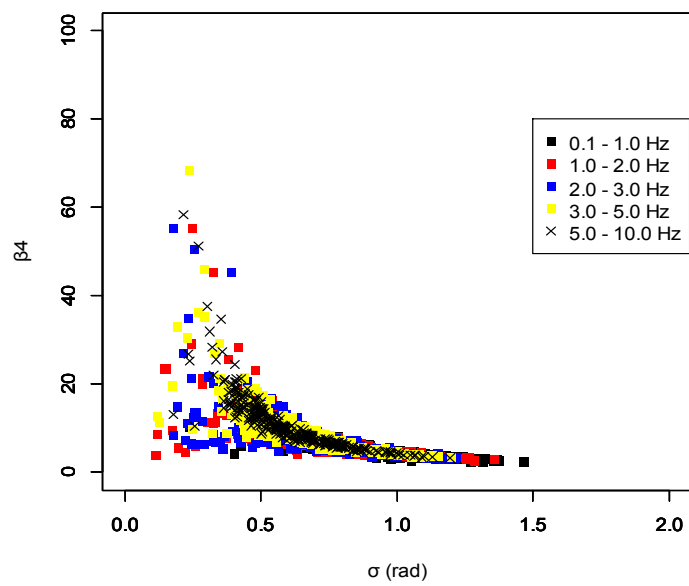


c) β_3 - β_4 relation

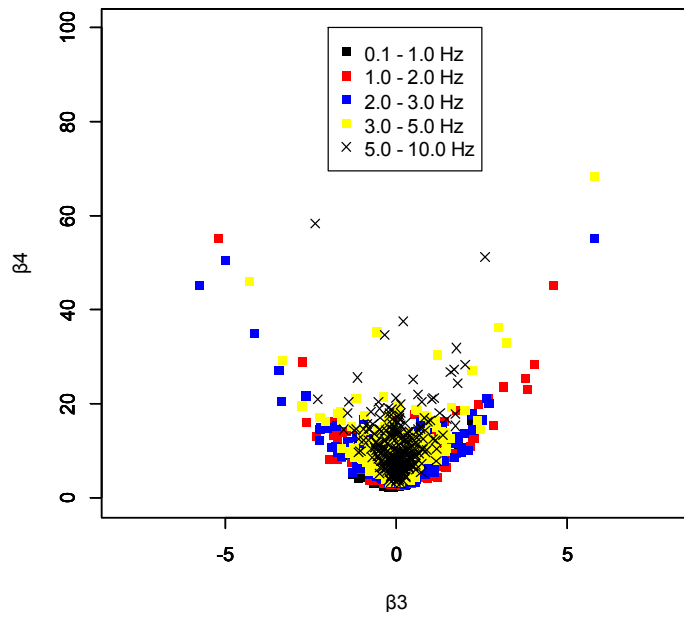
Fig.2.18: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Niigataken chuetsuoki earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

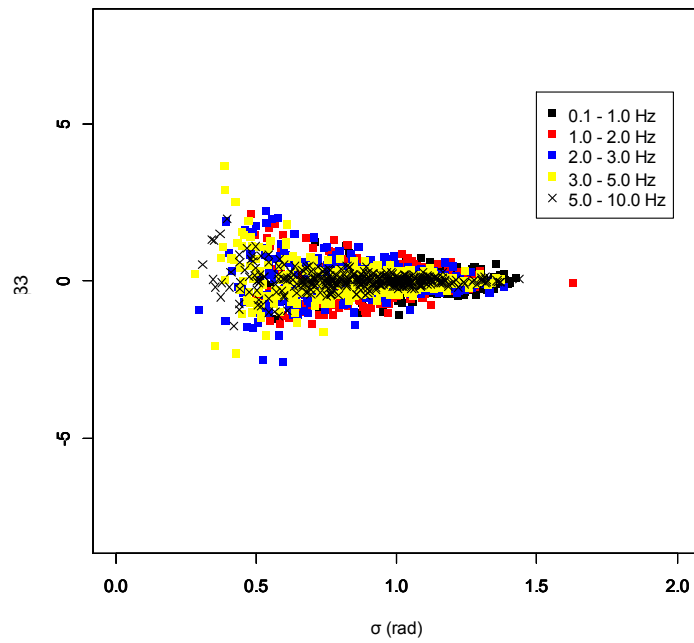


b) σ - β_4 relation

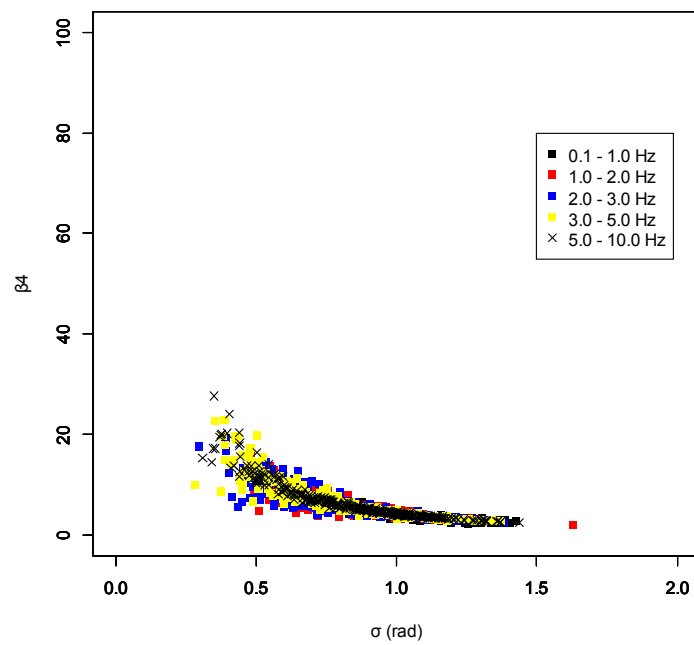


c) β_3 - β_4 relation

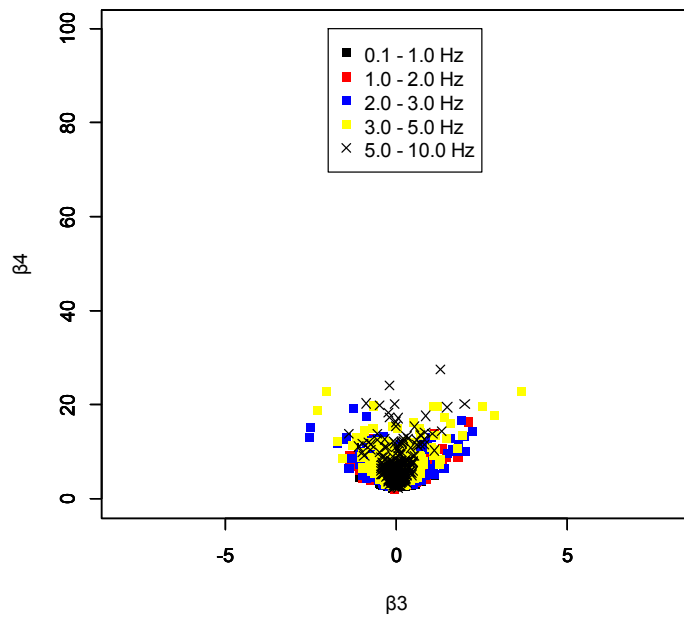
Fig.2.19: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2008 Iwate – Miyagi nairiku earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

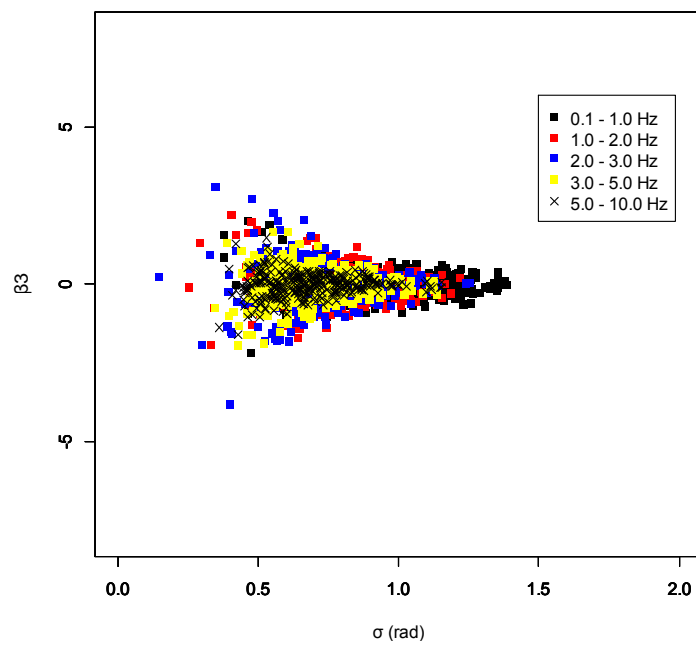


b) σ - β_4 relation

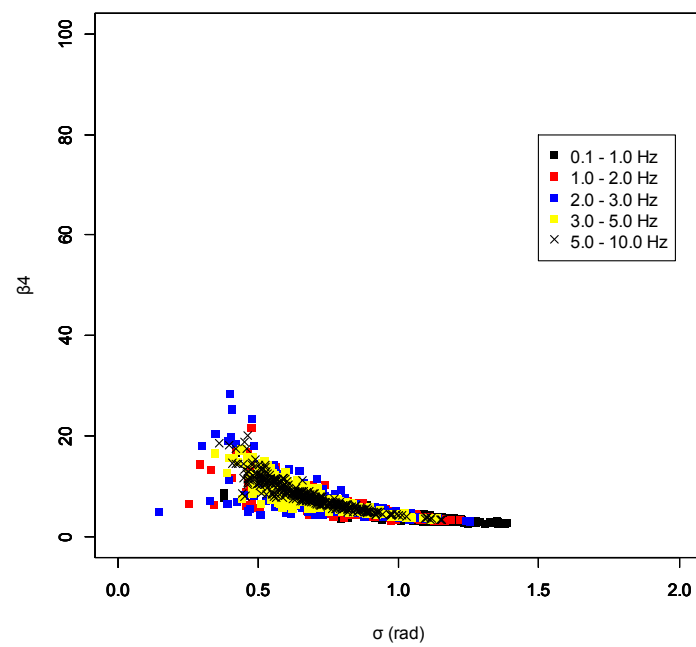


c) β_3 - β_4 relation

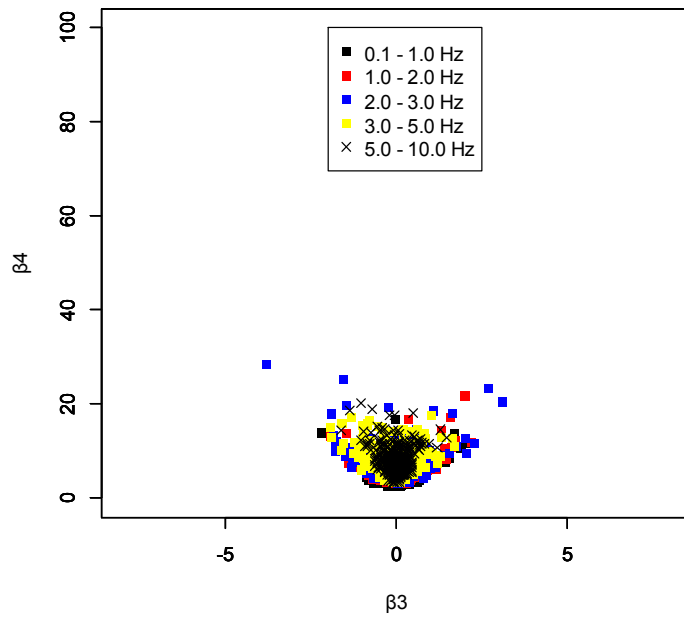
Fig.2.20: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Tokachi oki earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

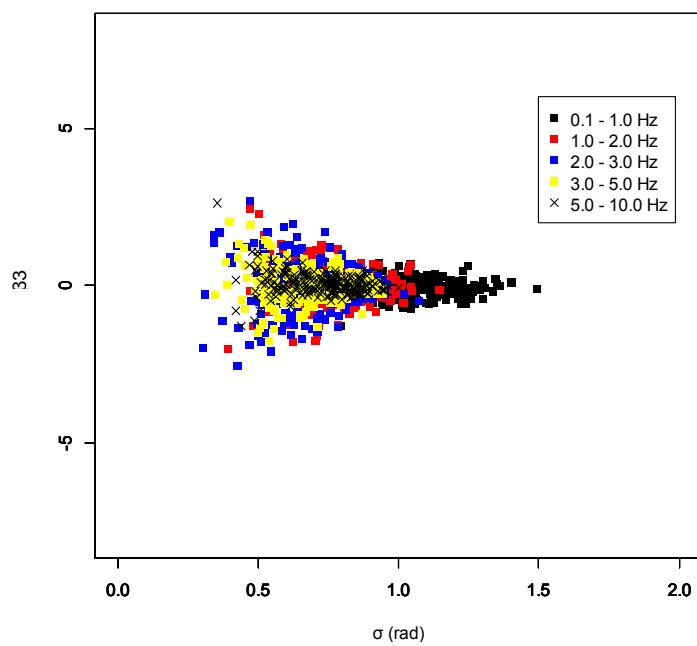


b) σ - β_4 relation

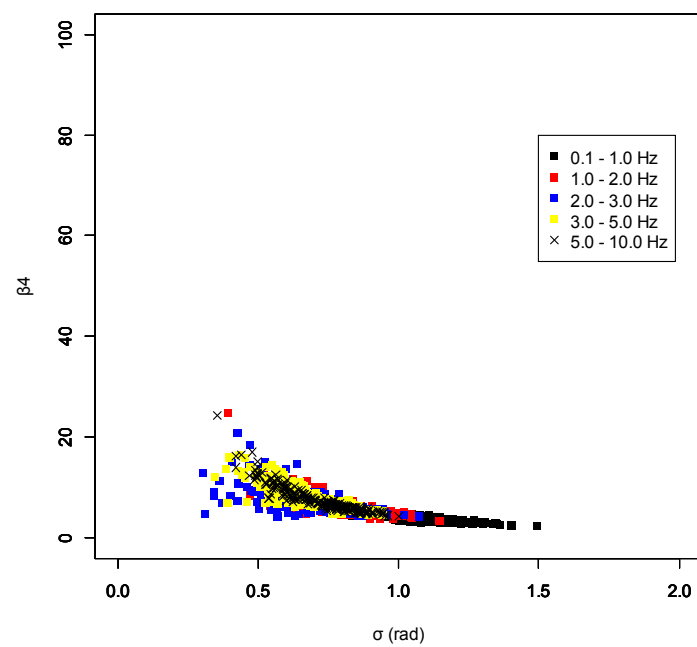


c) β_3 - β_4 relation

Fig.2.21: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Miyagiken oki earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation

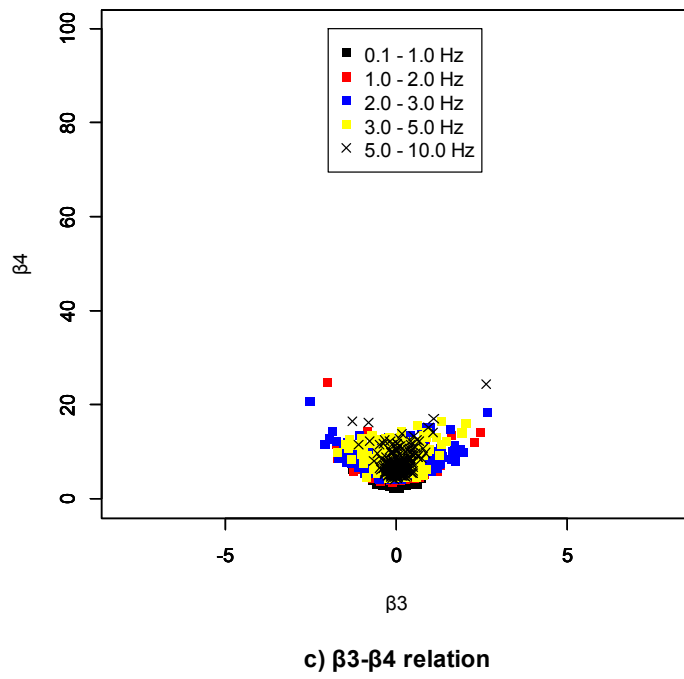
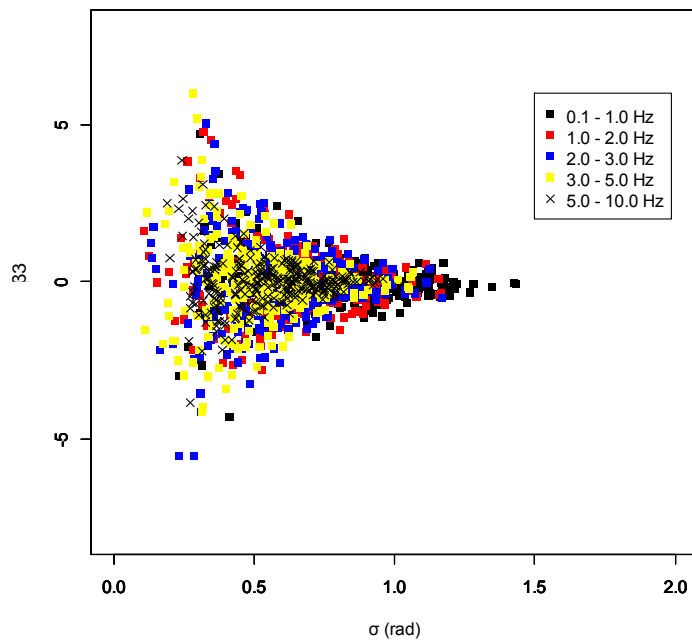
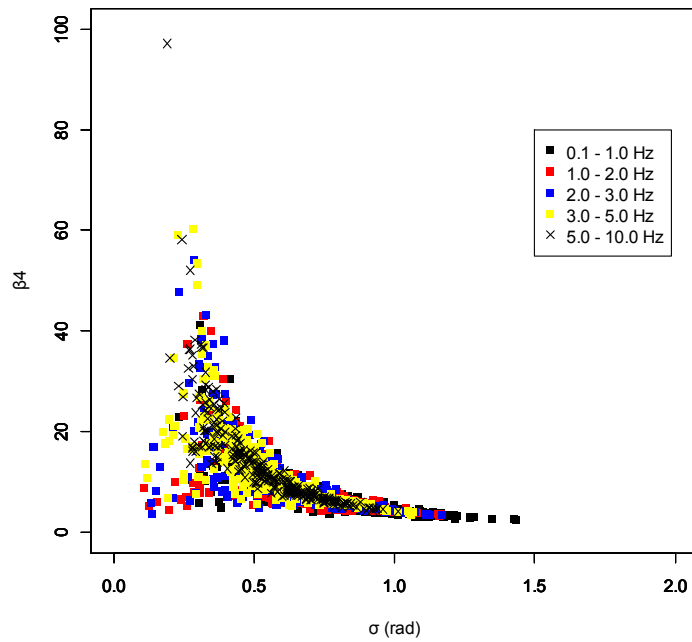


Fig.2.22: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2011 Sanriku oki earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation

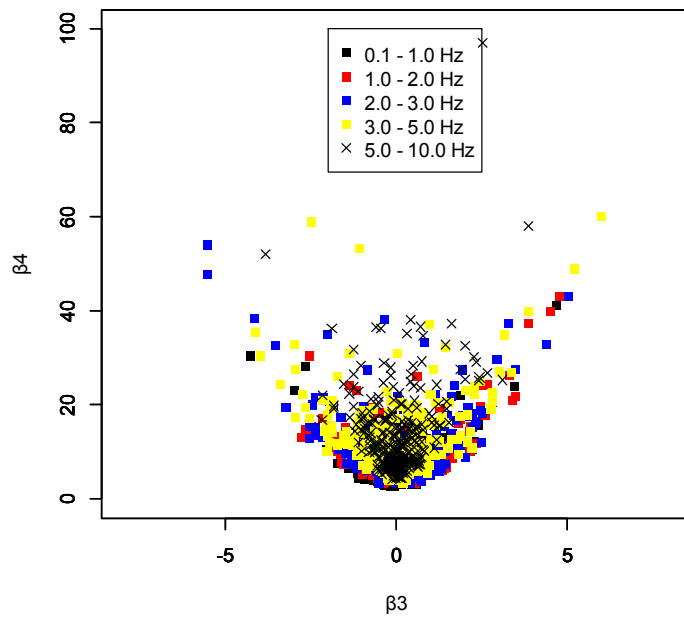
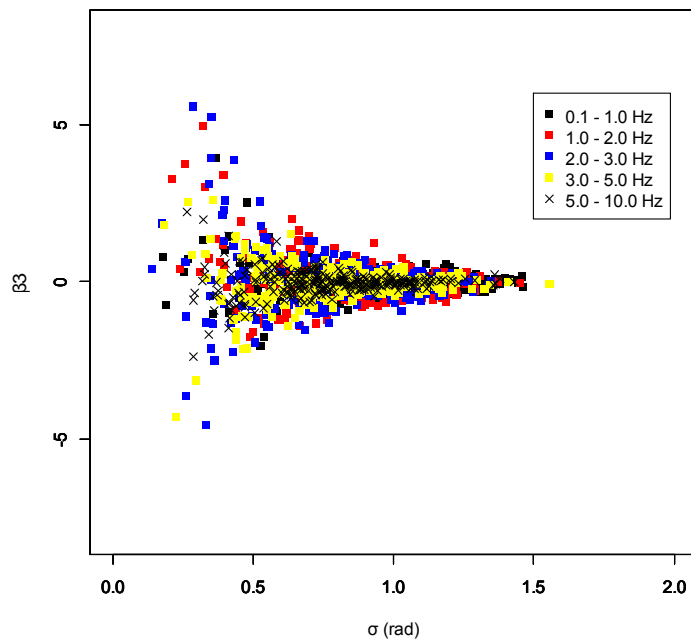
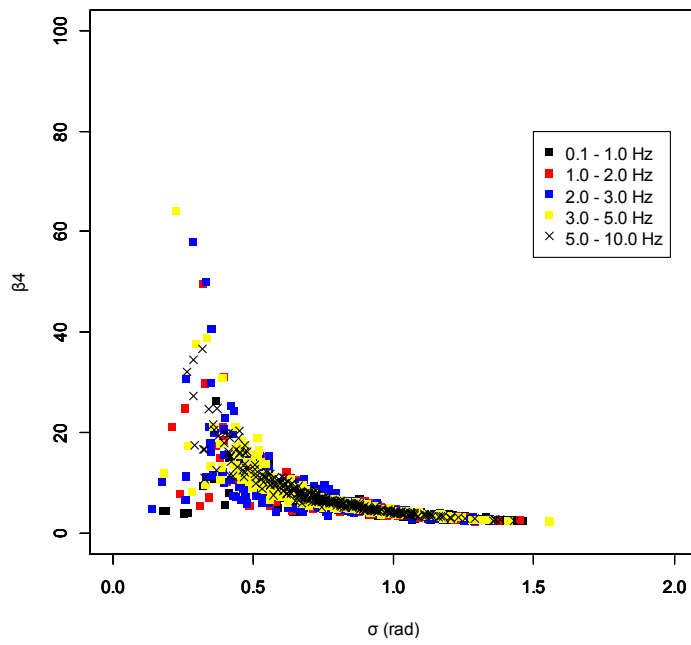


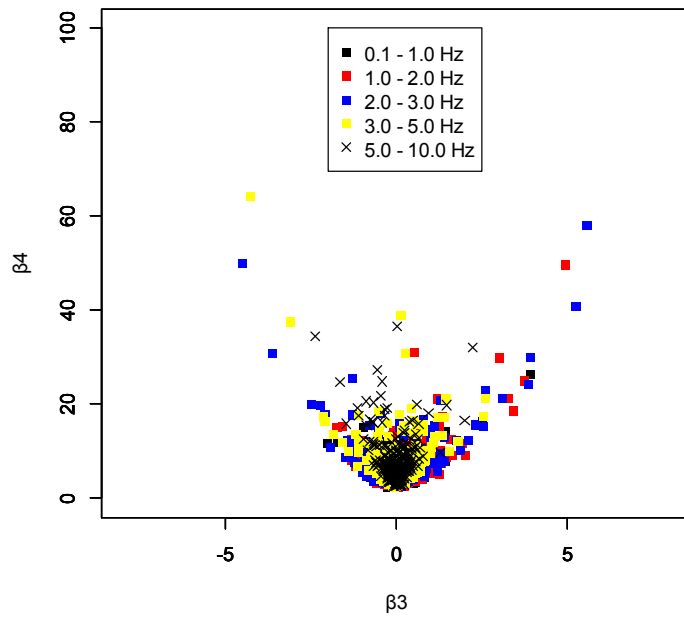
Fig.2.23: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Geiyo earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

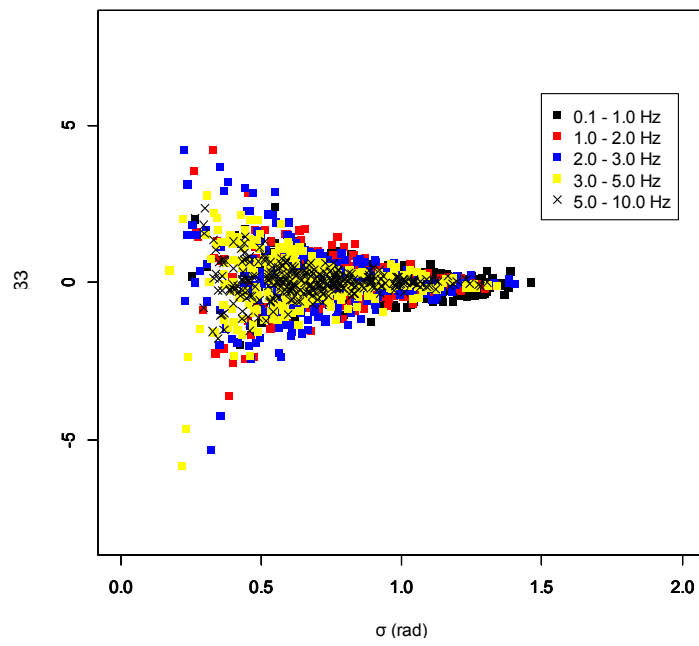


b) σ - β_4 relation

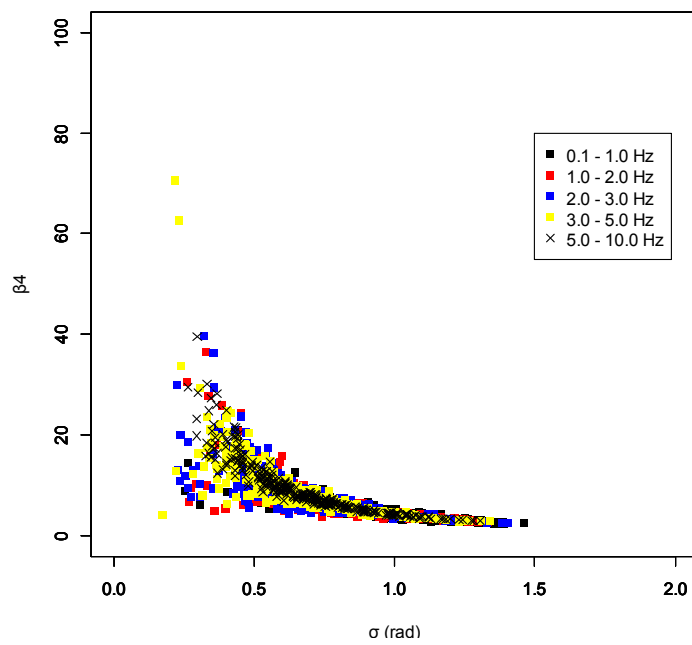


c) β_3 - β_4 relation

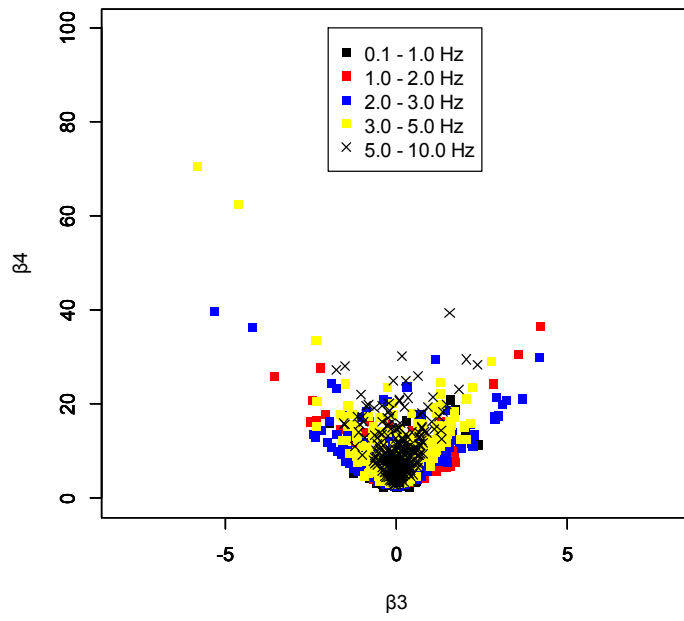
Fig.2.24: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Iwateken nairikunanbu earthquake in the five frequency bands



a) σ - β_3 relation

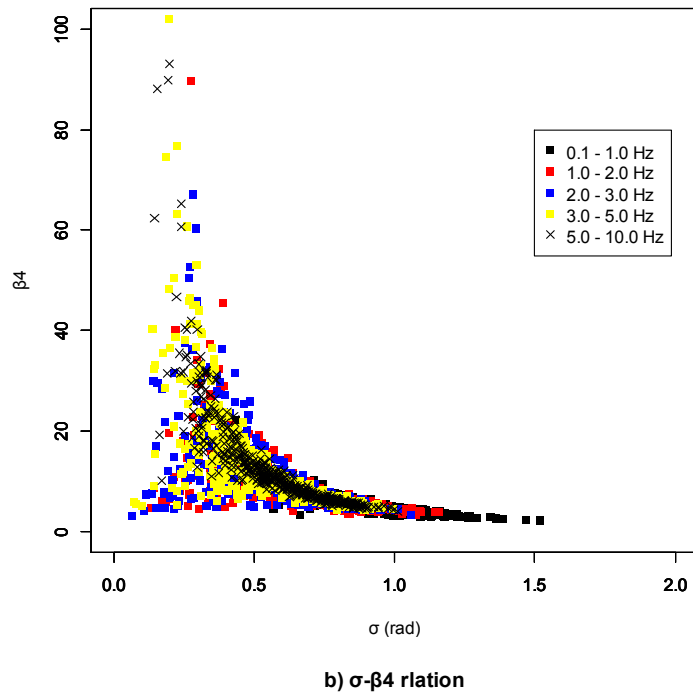
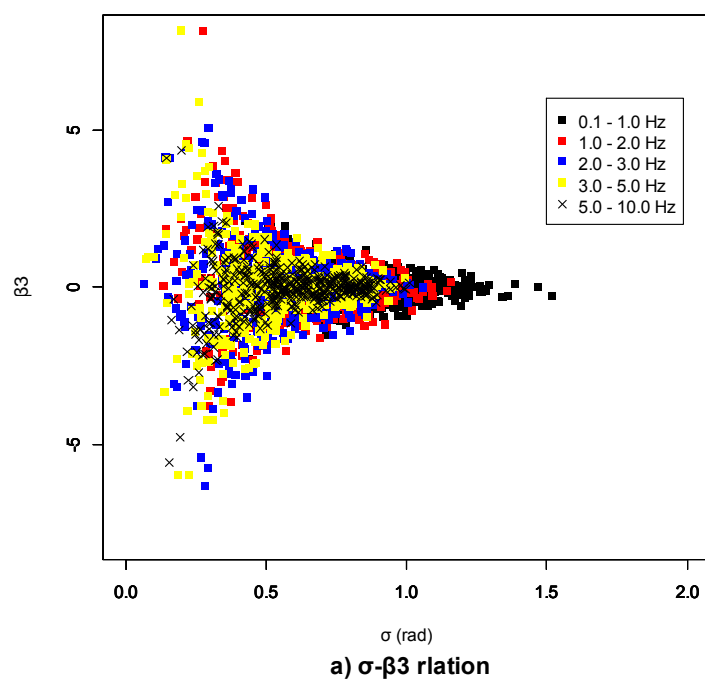


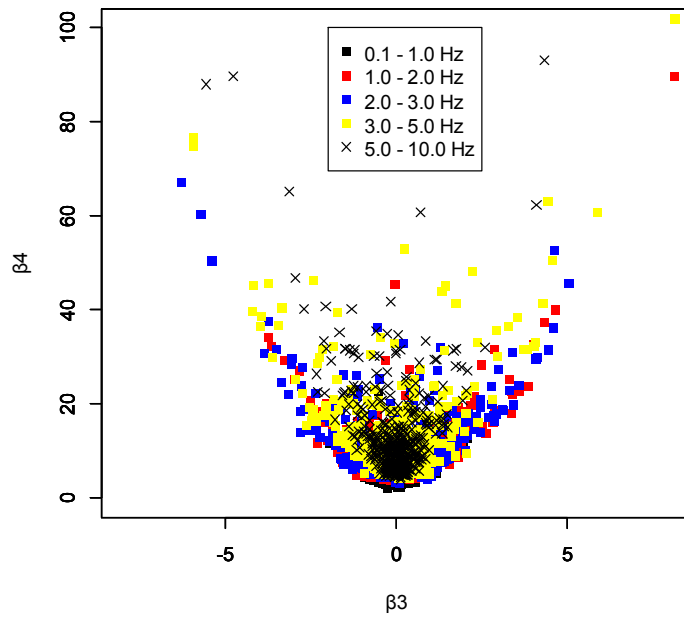
b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.2.25: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Miyagiken oki earthquake in the five frequency bands





c) β_3 - β_4 relation

Fig.2.26: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2009 Surugawan earthquake in the five frequency bands

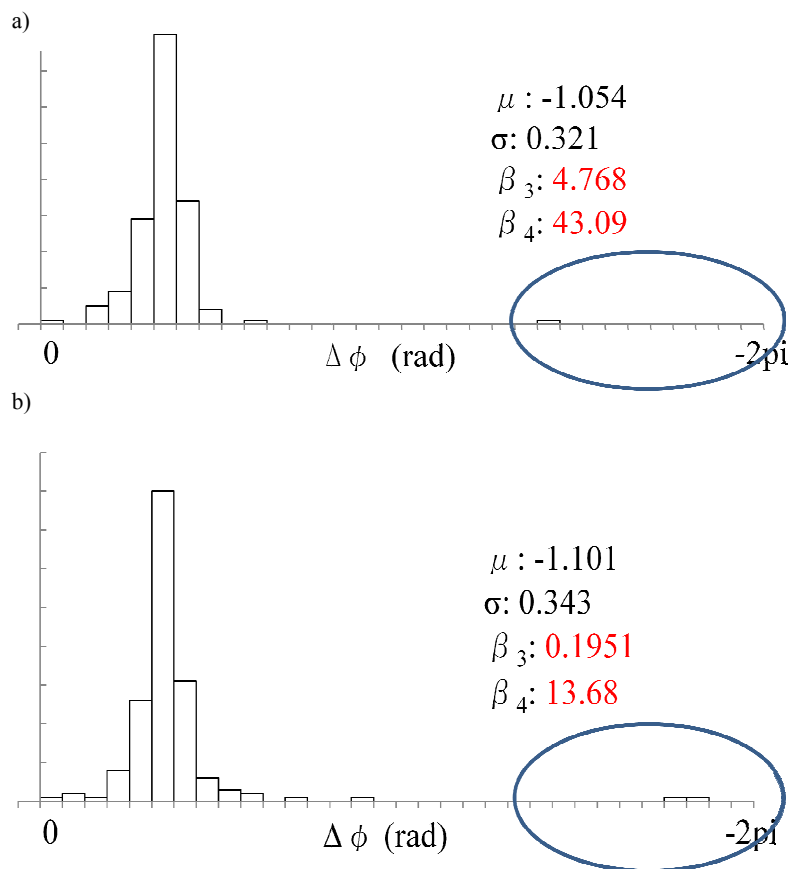


Fig.2.27: two similar phase difference distributions having significantly different β_3 and β_4 values

2.3 まとめ

本章では 1.6 節の Table.1.1 に挙げられた地震で得られた KiK-net 地中サイトの観測波形について位相差分の σ , β_3 , β_4 を算出した. 2.1 節では全周波数帯域でのそれぞれの関係を議論した. その結果, 地震のメカニズムや規模などの違いに依らず共通した傾向があることが分かった. 2.2 節では新たに帯域を 5 つ設定し, それぞれの統計量の関係を論じた. そして σ と β_4 については σ が 0.4 程度以下の時に β_4 が大きいケースと小さいケースがあることを指摘した.

第二章の参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.

3. 外れ値についての考察

2.3 節において、 β_3 と β_4 の値は位相差分の平均 μ から離れた少数のデータにより大きな影響を受けている可能性があるとして述べた。本論文内ではこのような少数のデータを外れ値 (outlier) と呼ぶこととする。ところで山根・長橋 (2005)¹⁾はフーリエ変換のリンク効果により -2π 付近に位相差分データが現れる可能性があるとして指摘している。また川西・佐藤 (2002)²⁾は群遅延時間 t_{gr} (位相差分 $\Delta\phi$ を $\Delta\omega$ で除した値) の考察において、平均 μ_{tgr} から離れた t_{gr} が存在する周波数ではフーリエ振幅が小さいと述べている。さらに白井・大町 (2005)³⁾は、フーリエ振幅は最小位相推移関数 (Minimum Phase Shift Function, MPS) と全域通過関数 (All Passing Function, AP) に分割でき、MPSにおいてフーリエ振幅が小さくなる周波数になるとフーリエ位相の変化率の負の傾きが大きくなることを数理的に示している。これらの既往の報告を踏まえ著者は、本研究で解析した波形について位相差分が外れ値となる周波数でのフーリエ振幅レベルを定量的に評価することにした。なぜなら、もし外れ値となる周波数においてフーリエ振幅が無視できるほど小さいならば、これらの周波数成分の構造物の応答への寄与は小さく、 β_3 と β_4 の計算で外れ値を除外することが可能であると思われるからである。

3.1 外れ値の定義

本論文では周波数帯域内の位相差分の平均 μ と標準偏差 σ から、 k 次の位相差分 $\Delta\phi_k$ を外れ値であるとして次のように表現する。

$$\Delta\phi_k < \mu - R_{sig} * \sigma \quad (3.1)$$

ここに、 $\Delta\phi_k$ = 外れ値

μ = 位相差分の平均値

σ = 位相差分の標準偏差

R_{sig} = 定数

R_{sig} の候補として2,3,4の3ケースを検討した。今、全データに占める外れ値の割合を R_{num} として

$$R_{num} = \frac{\text{Number of outliers}}{\text{Total number of data}} \quad (3.2)$$

と定義し、いくつかの波形について R_{sig} をそれぞれ2,3,4とそれぞれ置いたときの R_{num} を調べた。その結果を横軸に R_{sig} 、縦軸に R_{num} を取ってFig.3.1に示す。

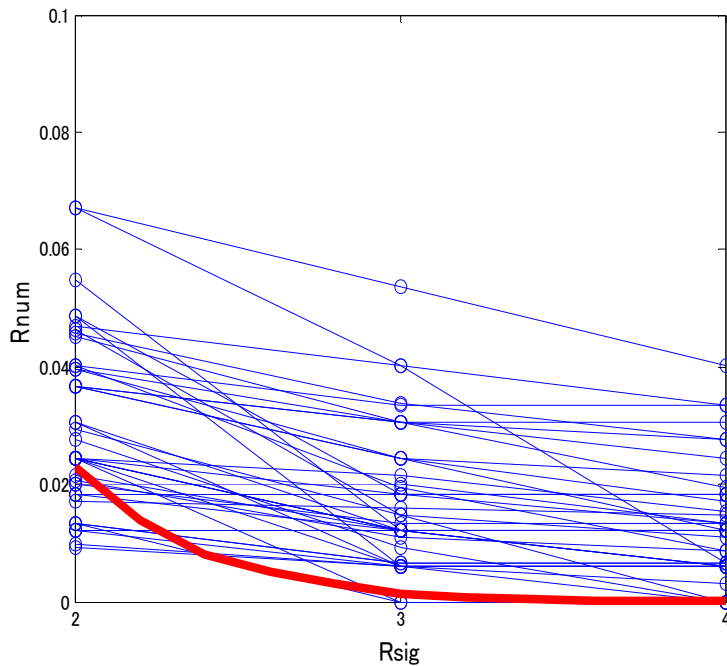


Fig.3.1: R_{sig} and R_{num} in several phase difference distributions

比較のために Fig.3.1 には標準正規確率変量 S の累積分布関数 (*Cumulative Distribution Function, CDF*) を $\Phi(S)$ とし, S を 2 から 4 まで変化させた時の $1 - \Phi(S)$ の値を赤線で示した.

Fig.3.1 から, 位相差分布は *CDF* (赤線) と比べ, 平均から離れた領域に多くのデータがあることが分かる. 特に $R_{sig}=2$ の時はいくつかの波形で, 総データ数の 1 割近くが外れ値と判定される (*CDF* の場合は 2 パーセント程度). また $R_{sig}=3$ の時には Fig.3.2 のように位相差分布を構成する左側のメインの「山」を一部, 外れ値と判定する例があったため, 本研究では $R_{sig}=4$ として外れ値を定義した.

ところで波形をフーリエ変換すると (ナイキスト振動数を考慮して) フーリエ振幅とフーリエ位相角がそれぞれ $N/2-1$ 個ずつ算出される. 一方で式 (1.1) から分かるように位相差分は隣り合う二つの位相角の差で定義されるため, 位相差分の個数は $N/2-2$ となりフーリエ振幅とは一対一で対応しない. しかし k 次の位相差分は k 次の位相角と $k+1$ 次の位相角で構成され, さらに各々の位相角とフーリエ振幅は一対一で対応する. よって位相差分とフーリエ振幅の関係を検討するには, k 次の位相差分が外れ値としたら k 次と $k+1$ 次のフーリエ振幅を考慮する必要がある.

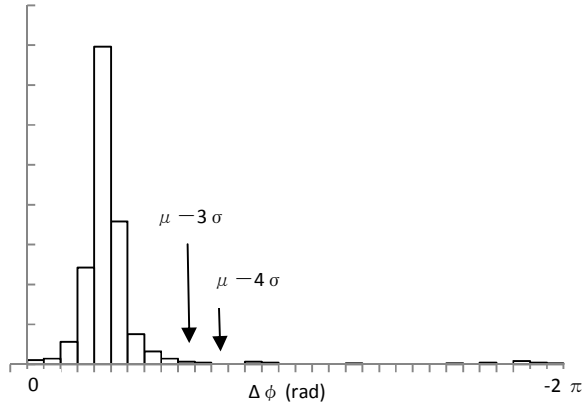


Fig.3.2: locations of $\mu - 3\sigma$ and $\mu - 4\sigma$ in an example of phase difference distribution

3.2 定量的評価の方法

本節では、位相差分が外れ値を取る周波数におけるエネルギーが入力エネルギー全体に対してどの程度の割合を占めているかを評価する。ここでは以下の式 (3.3) に示すエネルギーに関する指標 $R_{E,k}$ と $R_{E,k+1}$ を用いて評価を行う。今、 k 次の位相差分が外れ値であるとして、

$$R_{E,k} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{out}} F_{k_i}^2}{\sum F^2} \quad (3.3.a)$$

$$R_{E,k+1} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{out}} F_{k+1_i}^2}{\sum F^2} \quad (3.3.b)$$

ここに $\sum F^2$ は帯域内に含まれる全エネルギー、 N_{out} は帯域内の外れ値の個数、 $F_{k_i}^2$ 、 $F_{k+1_i}^2$ はそれぞれ k 次、 $k+1$ 次のフーリエ振幅が持つエネルギーである。Fig.3.3 に概念的に式 (3.3) 内の記号の意味を示す。なお Fig.3.3 では F_k と F_{k+1} がそれぞれ二つずつ出てきているが、それはこの帯域に外れ値が二つあることを意味する (i.e. $N_{out}=2$)。この図から分かるように R_E は帯域に含まれる外れ値全体のエネルギーが帯域内の全エネルギーに対して占める割合を表す。

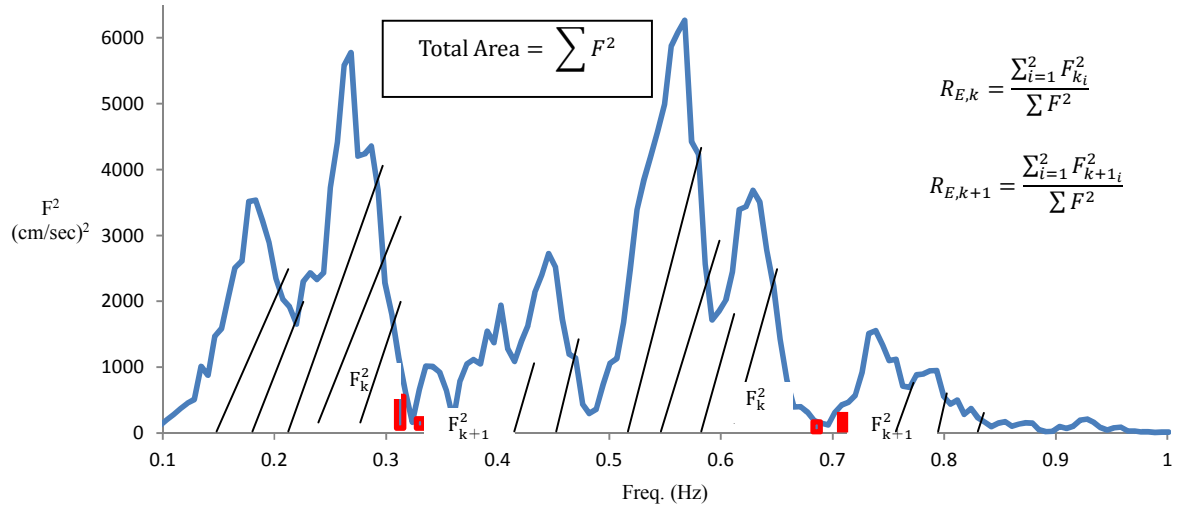


Fig.3.3: schematic representation for concept of R_E

3.3 解析データについて

2.2 節に挙げた, Fig.2.14 ~ Fig.2.17 から分かるように $\sigma = 0.6$ 未満の領域において β_4 は最小で 10 未満, 最大で 100 程度とかなりばらつく. このことから外れ値が β_3 と β_4 に与える影響は一般的に σ が小さいときほど大きいと考えられる. そこで本節では 1.6 節の Table.1.1 に挙げられた地震の波形のうち, $\sigma < 0.6$ を満たすデータ中心に $R_{E,k}$ と $R_{E,k+1}$ を算出した. 考慮した帯域は 2.2 節で扱った 5 つの帯域および 2.1 節で議論した 0.1–10.0 Hz である. 本論文における検討では, それぞれの帯域に含まれる全位相差分のうち, 平均して 1.86 %, 1.67 %, 1.59 %, 1.55 %, 1.59 %, 1.60 % が外れ値であった.

3.4 結果

Fig.3.4 に σ と β_4 から見た $R_{E,k}$ と $R_{E,k+1}$ の値を三次元の散布図として示す. ほぼ全ての値が 0.5 パーセントを下回っていることが分かる. Table.3.1 に合わせて 6 つの帯域それぞれにおける $R_{E,k}$ と $R_{E,k+1}$ の平均値を示す. これらの数値から考えても, 位相差分が外れ値となるような周波数においてはフーリエ振幅がかなり小さいということが見て取れる.

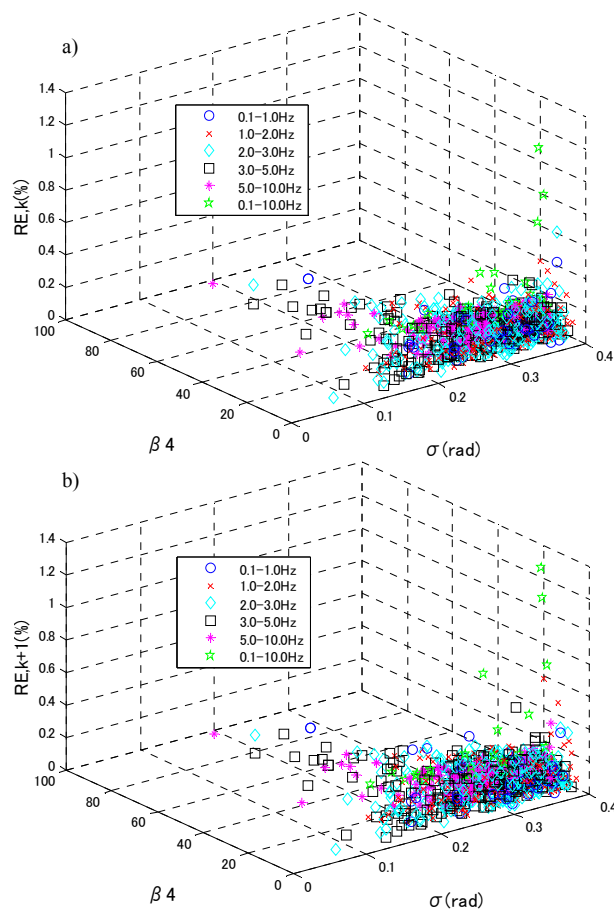


Fig.3.4: relationship between a) $R_{E,k}$, σ , and β_4 b) $R_{E,k+1}$, σ , and β_4

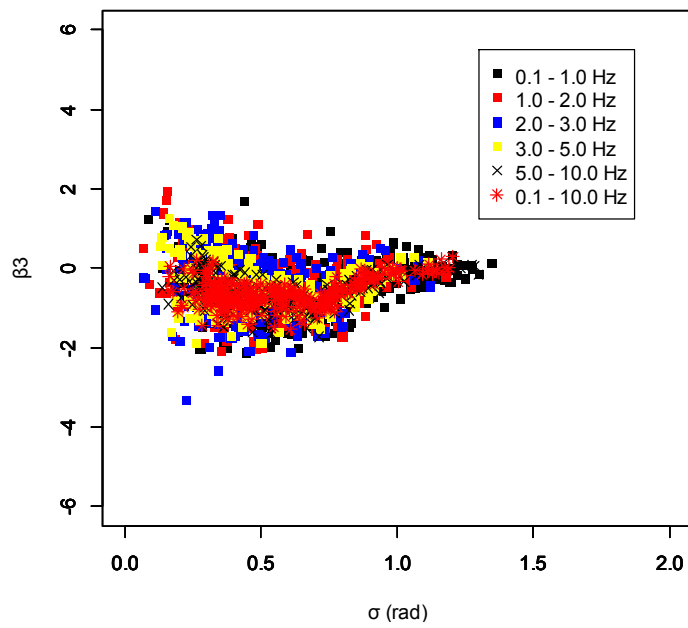
Table.5.1: average R_E values for all frequency bands

	0.1 – 1.0 Hz	1.0 – 2.0 Hz	2.0 – 3.0 Hz	3.0 – 5.0 Hz	5.0 – 10.0 Hz	0.1 – 10.0 Hz
R_{num}	1.86 %	1.67 %	1.59 %	1.55 %	1.59 %	1.60 %
$R_{E,k}$	0.16 %	0.11 %	0.085 %	0.080 %	0.072 %	0.14 %
$R_{E,k+1}$	0.15 %	0.10 %	0.089 %	0.082 %	0.074 %	0.15 %

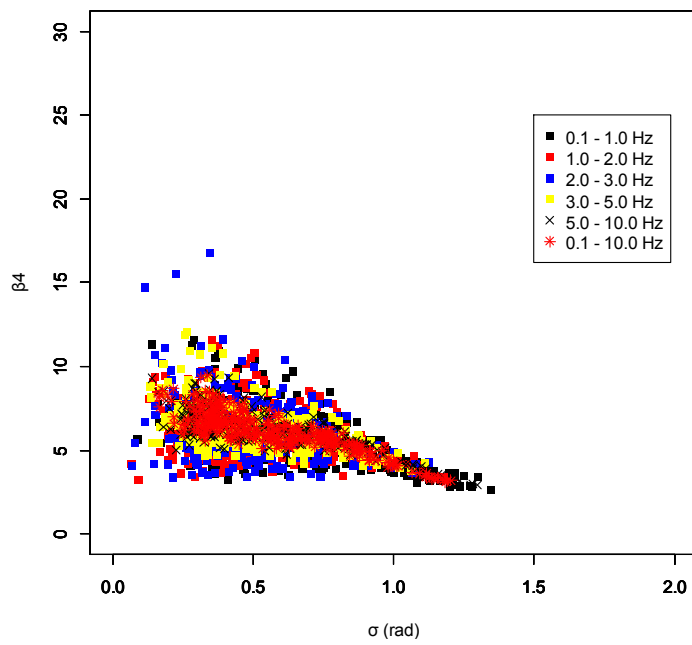
3.5 外れ値なしの統計量

これまでの議論によって位相差分の外れ値を取る周波数においては、フーリエ振幅が非常に小さいことが分かった。それゆえにこういった周波数成分は構造物の応答にほとんど寄与しないと考えられる。よってその応答への影響の小ささゆえに、位相差分の統計量の計算には外れ値の影響は含めなくてよいと判断した。

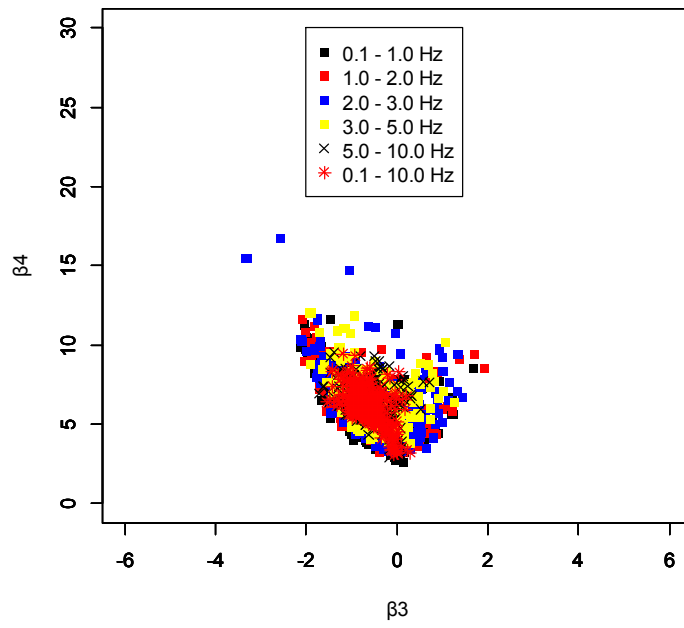
位相差分の外れ値を抜いた時の σ , β_3 , および β_4 を算出しそれぞれの間の関係性を調べた. (計算には Appendix.A の A.3 を用いた) その結果を以下, Fig.3.5~Fig.3.17 に地震毎に示していく. それぞれの図を見ると σ と β_3 の関係において β_3 の値は負を取ることが多くなり, $\sigma = 0.7$ 付近で β_3 の値が落ち込んでいること, また σ と β_4 は線形に近い関係性を示すことが見て取れる. 同時に著者はこれらの結果について回帰分析も行った. その回帰係数は Table.3.2~Table.3.14 に地震毎に示されている. ここで, σ は分散 (二次モーメント) の平方根であるのに対して, β_3 は三次モーメントなので本来ならば σ から β_3 を回帰するならば二次式の非線形回帰分析を行うのが妥当である. しかし位相差分はその定義から必ず 0 から -2π の範囲に値が収まっている (すなわち上限・下限値が定義されている) ことと関連し, σ が大きい領域では β_3 の値は大きくなりにくい. 実際 Fig.3.5 から Fig.3.17 を見ると σ が 1.0 付近から, β_3 の値はほぼフラットである. そこで著者は σ と β_3 の関係については三次式の非線形回帰分析を行った. 三次式ならば σ が大きい領域で, ある程度 β_3 の値が上昇するのを防げる. また σ と β_4 は線形に近い関係性を示していることから線形の回帰分析を, β_3 と β_4 は放物線のような関係性を示していることから二次式の非線形回帰分析を行った.



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.5: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2000 Tottoriken seibu earthquake in the six frequency bands (without outliers)

Table.3.2: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2000 Tottoriken seibu

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	1.844	-10.86	14.04	-5.216
1.0 – 2.0 Hz	1.129	-6.312	6.325	-1.299
2.0 – 3.0 Hz	0.4696	-2.739	-0.08055	2.233
3.0 – 5.0 Hz	0.8978	-5.413	4.205	0.2375
5.0 – 10.0 Hz	1.233	-8.331	10.14	-3.316
0.1 – 10.0 Hz	0.5143	-5.788	7.370	-2.307

b) σ - β_4 relation

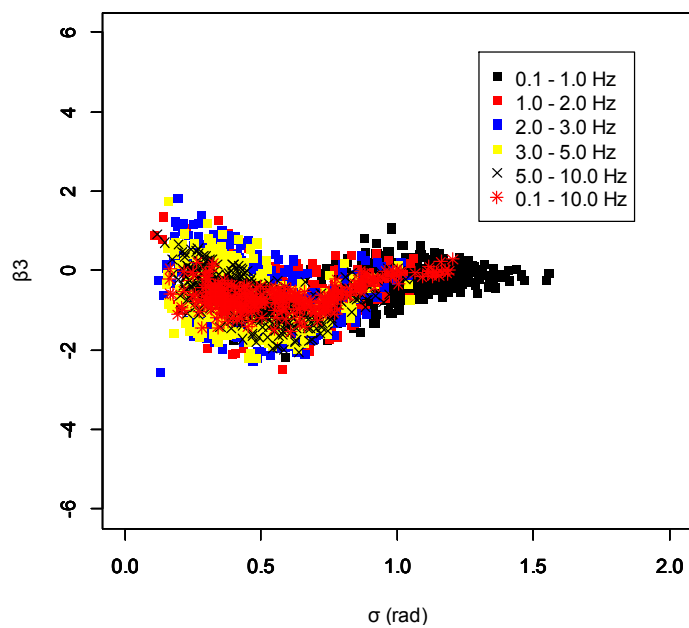
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.672	-3.265
1.0 – 2.0 Hz	7.022	-1.872
2.0 – 3.0 Hz	7.724	-2.886
3.0 – 5.0 Hz	8.153	-3.456
5.0 – 10.0 Hz	8.124	-3.420
0.1 – 10.0 Hz	8.460	-4.078

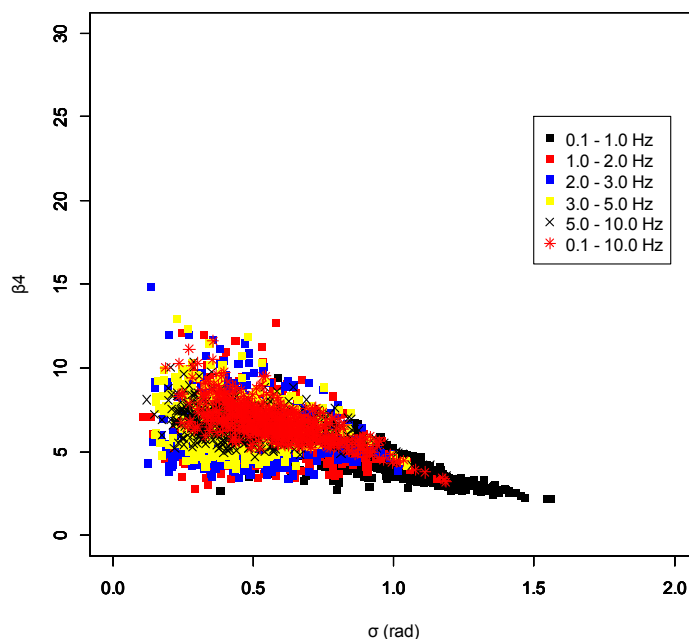
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

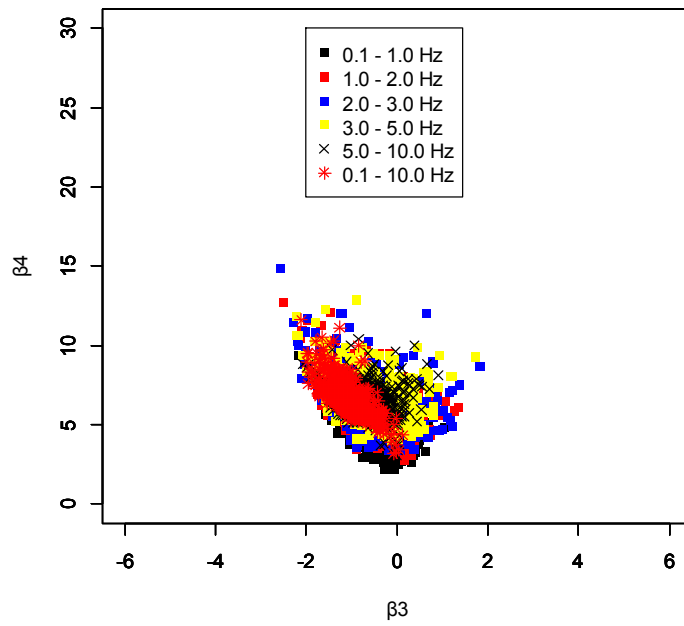
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	4.505	-0.006341	1.381
1.0 – 2.0 Hz	5.185	-0.09372	1.204
2.0 – 3.0 Hz	5.463	0.04744	1.142
3.0 – 5.0 Hz	5.903	0.4752	1.444
5.0 – 10.0 Hz	5.871	-0.05694	0.7190
0.1 – 10.0 Hz	4.799	-2.525	-0.5138



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.6: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2004 Niigataken chuetsu earthquake in the six frequency bands (without outliers)

Table.3.3: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2004 Niigataken chuetsu earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	0.3266	-6.275	9.186	-3.534
1.0 – 2.0 Hz	1.612	-8.043	6.527	-0.1773
2.0 – 3.0 Hz	0.3093	-0.04368	-8.560	8.437
3.0 – 5.0 Hz	-0.1096	1.476	-10.16	8.691
5.0 – 10.0 Hz	1.555	-8.909	9.245	-2.327
0.1 – 10.0 Hz	0.1148	-5.890	7.383	-1.881

b) σ - β_4 relation

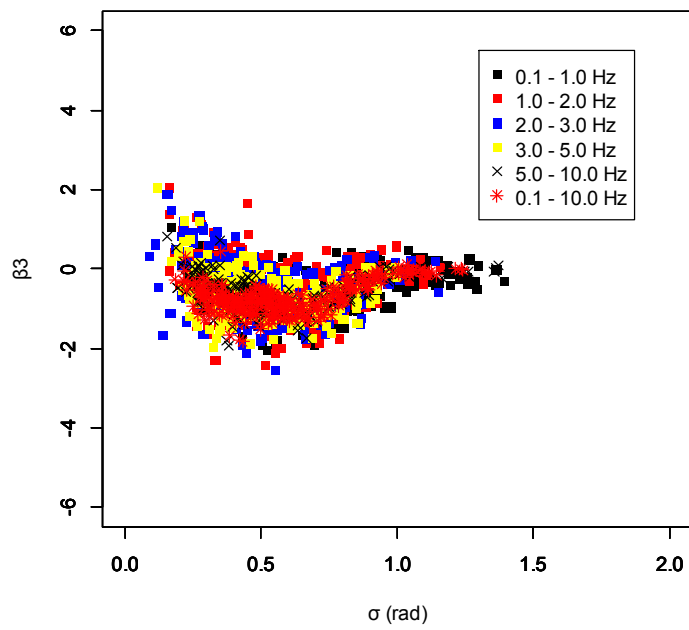
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	8.209	-4.005
1.0 – 2.0 Hz	7.037	-1.912
2.0 – 3.0 Hz	7.020	-1.418
3.0 – 5.0 Hz	7.570	-2.079
5.0 – 10.0 Hz	7.842	-2.655
0.1 – 10.0 Hz	9.461	-4.699

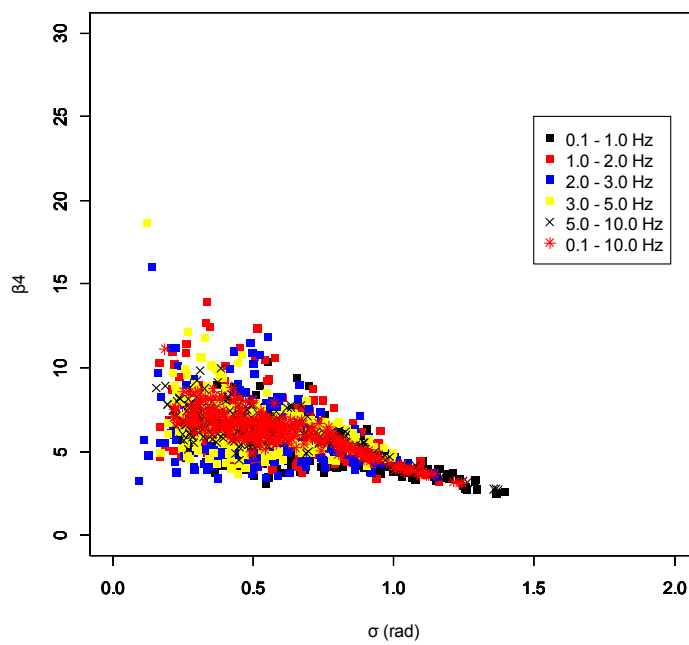
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

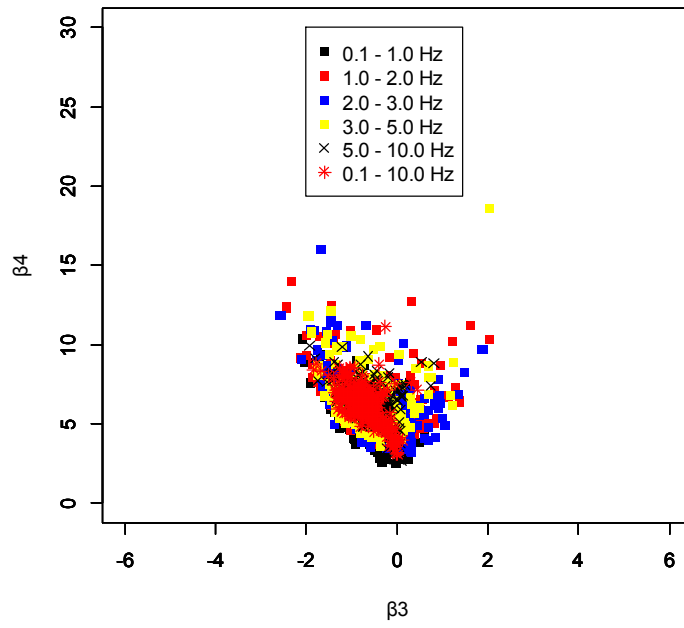
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.845	0.03150	1.276
1.0 – 2.0 Hz	5.003	-0.2240	0.9893
2.0 – 3.0 Hz	5.356	-0.06312	1.053
3.0 – 5.0 Hz	6.063	0.4280	1.042
5.0 – 10.0 Hz	6.338	0.5514	0.8041
0.1 – 10.0 Hz	4.558	-1.913	0.1183



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.7: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Fukuokaken seihouoki earthquake in the six frequency bands (without outliers)

Table.3.4: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Fukuokaken seihouoki

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	3.404	-17.58	22.54	-8.570
1.0 – 2.0 Hz	2.101	-10.99	12.90	-4.153
2.0 – 3.0 Hz	1.365	-6.295	4.243	0.5184
3.0 – 5.0 Hz	1.724	-9.938	11.22	-3.190
5.0 – 10.0 Hz	1.774	-11.46	15.02	-5.542
0.1 – 10.0 Hz	1.417	-10.92	15.19	-5.854

b) σ - β_4 relation

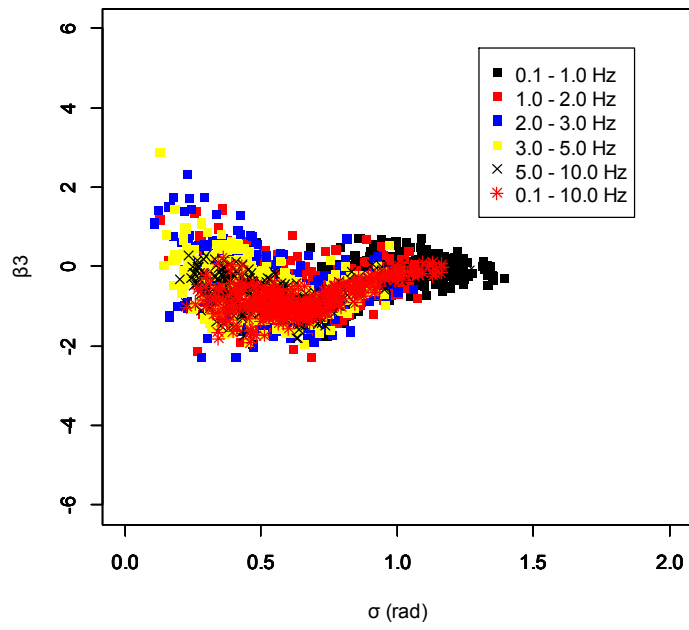
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.064	-2.671
1.0 – 2.0 Hz	7.897	-3.072
2.0 – 3.0 Hz	7.114	-2.075
3.0 – 5.0 Hz	8.096	-3.254
5.0 – 10.0 Hz	8.225	-3.520
0.1 – 10.0 Hz	8.673	-4.238

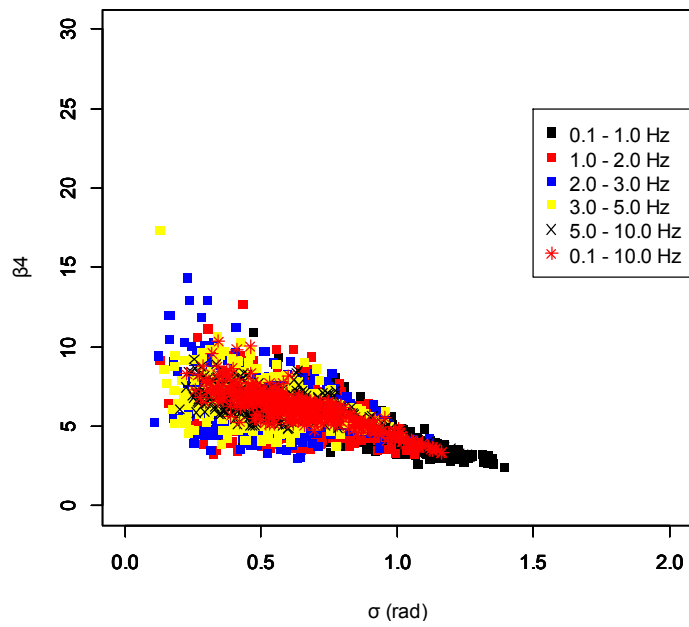
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	4.266	-0.2838	1.094
1.0 – 2.0 Hz	5.367	0.1783	1.297
2.0 – 3.0 Hz	5.128	-0.1235	1.239
3.0 – 5.0 Hz	5.908	0.9310	1.653
5.0 – 10.0 Hz	5.786	0.3137	1.275
0.1 – 10.0 Hz	4.809	-1.940	-0.02288



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation

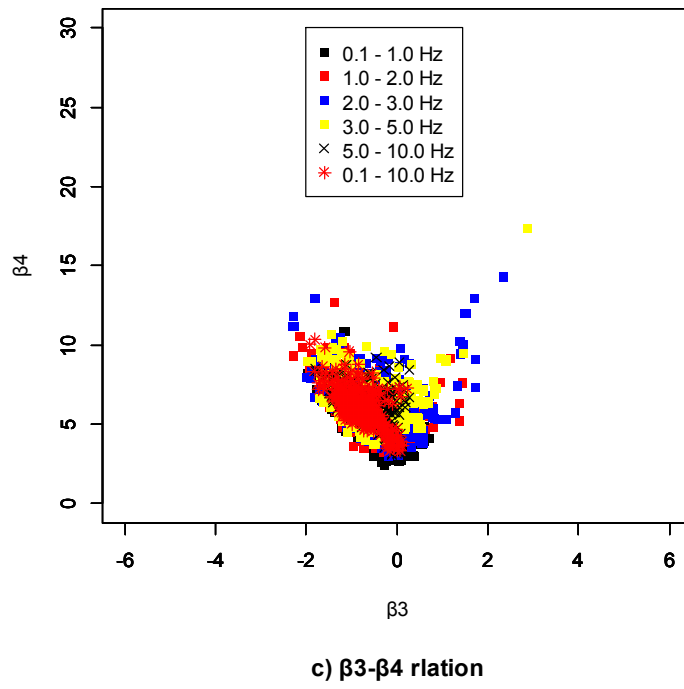


Fig.3.8: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Notohanto oki earthquake in the six frequency bands
(without outliers)

Table.3.5: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Notohanto oki

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	5.599	-24.86	30.58	-11.45
1.0 – 2.0 Hz	1.743	-8.006	6.974	-0.9411
2.0 – 3.0 Hz	1.725	-7.883	6.627	-0.7333
3.0 – 5.0 Hz	1.139	-4.709	0.05160	3.556
5.0 – 10.0 Hz	1.619	-9.566	11.00	-3.435
0.1 – 10.0 Hz	1.121	-9.255	11.97	-4.092

b) σ - β_4 relation

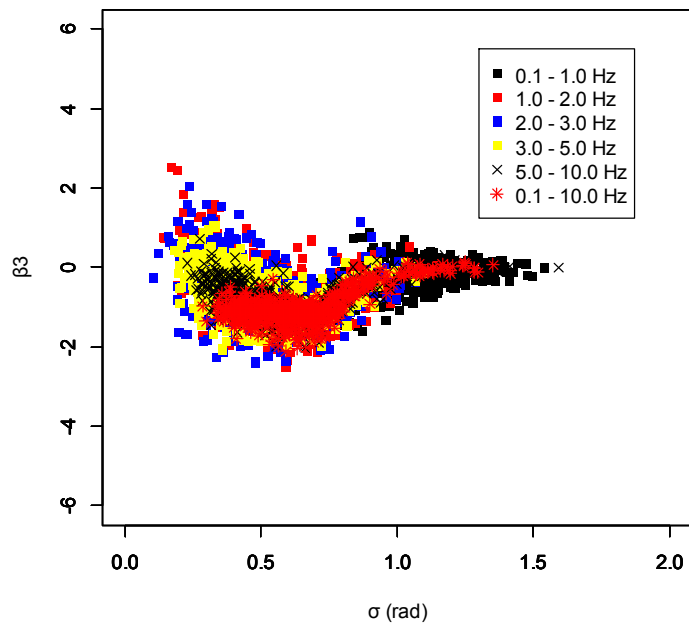
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	8.538	-4.289
1.0 – 2.0 Hz	7.225	-2.470
2.0 – 3.0 Hz	7.803	-2.936
3.0 – 5.0 Hz	7.906	-2.862
5.0 – 10.0 Hz	8.196	-3.411
0.1 – 10.0 Hz	9.125	-4.688

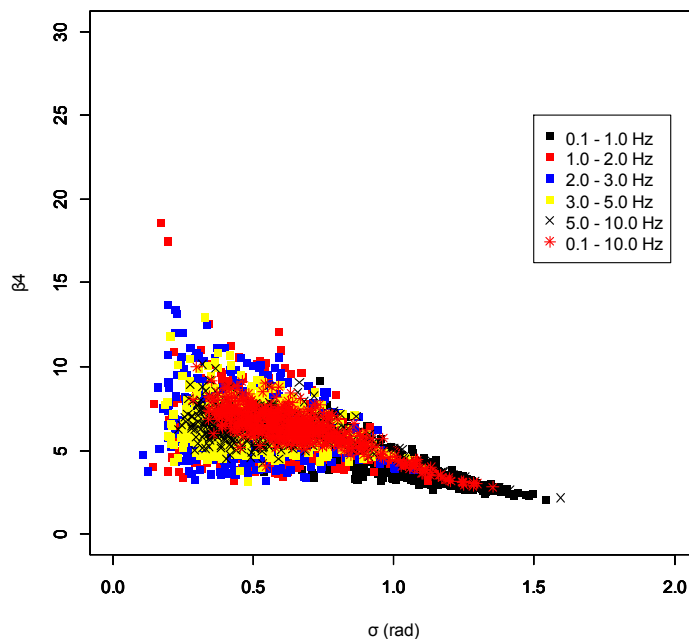
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

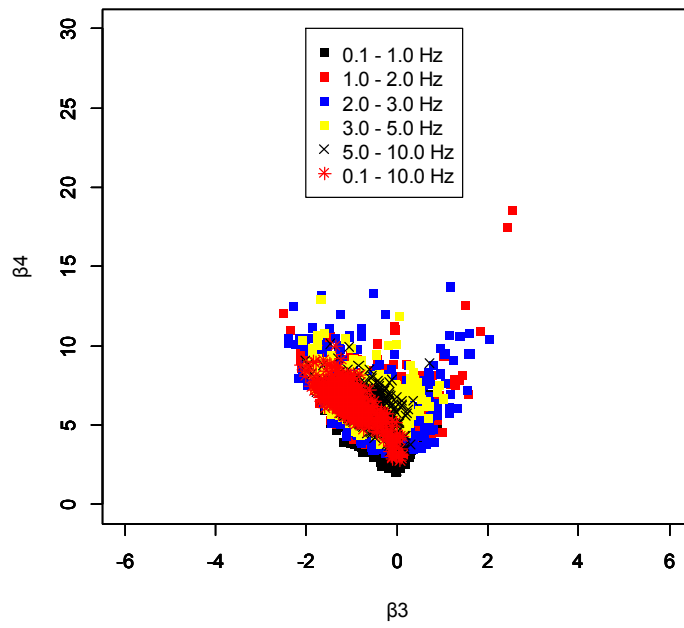
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.978	-0.2522	1.356
1.0 – 2.0 Hz	4.964	0.04625	1.154
2.0 – 3.0 Hz	5.495	0.3267	1.223
3.0 – 5.0 Hz	5.909	0.5873	1.228
5.0 – 10.0 Hz	5.664	-0.1424	0.6809
0.1 – 10.0 Hz	4.686	-1.439	0.3071



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.9: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Niigataken chuetsuoki earthquake in the six frequency bands (without outliers)

Table.3.6: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2007 Niigataken chuetsuoki

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	0.415	-6.679	9.718	-3.737
1.0 – 2.0 Hz	2.545	-11.75	11.53	-2.506
2.0 – 3.0 Hz	1.108	-4.132	-1.856	4.840
3.0 – 5.0 Hz	1.366	-6.949	4.150	1.284
5.0 – 10.0 Hz	2.691	-14.68	17.81	-6.165
0.1 – 10.0 Hz	2.557	-16.60	22.08	-8.317

b) σ - β_4 relation

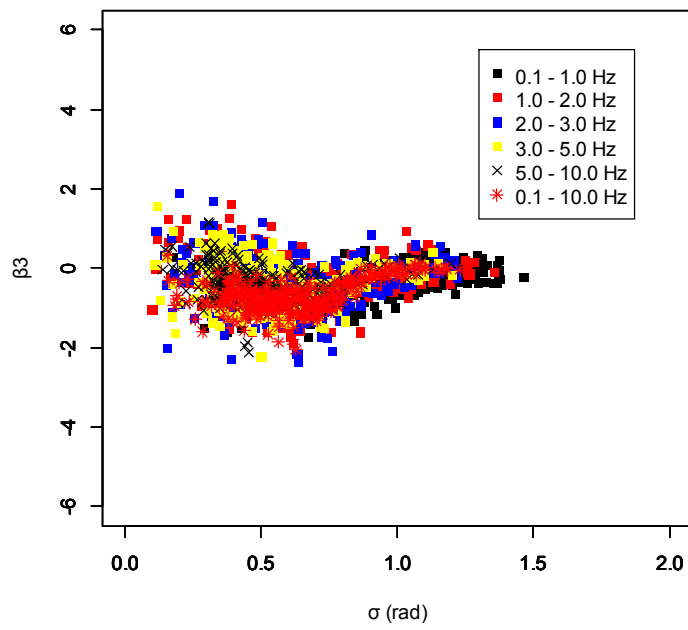
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	8.236	-4.092
1.0 – 2.0 Hz	7.607	-2.607
2.0 – 3.0 Hz	7.640	-2.614
3.0 – 5.0 Hz	7.542	-2.145
5.0 – 10.0 Hz	8.115	-3.250
0.1 – 10.0 Hz	9.467	-4.780

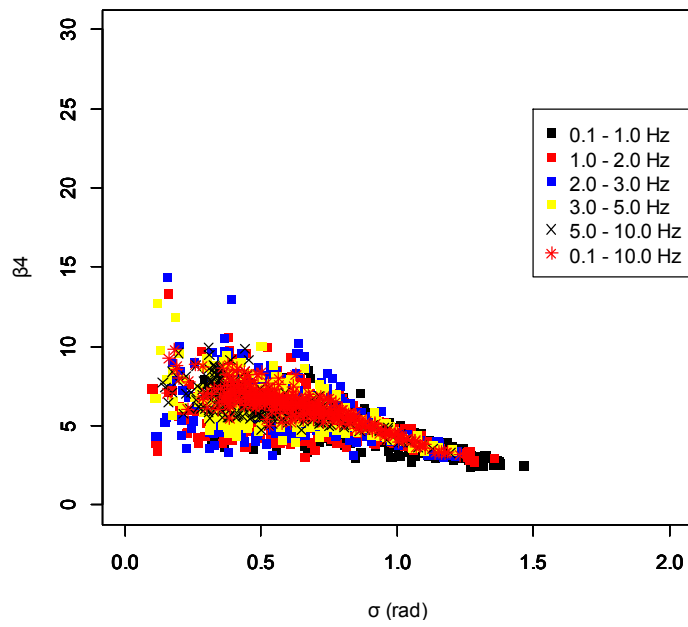
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

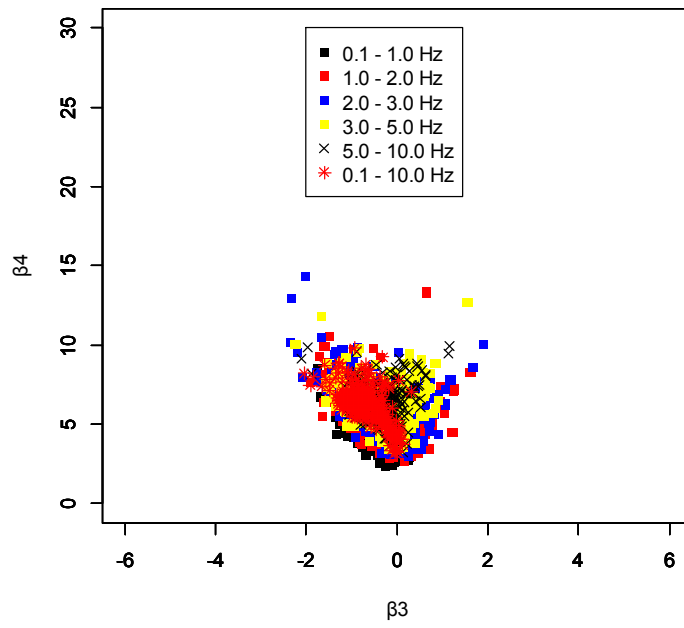
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.672	0.01059	1.297
1.0 – 2.0 Hz	5.440	0.5810	1.281
2.0 – 3.0 Hz	5.458	0.3761	1.211
3.0 – 5.0 Hz	6.004	0.6884	1.115
5.0 – 10.0 Hz	5.034	-1.725	-0.1802
0.1 – 10.0 Hz	3.848	-3.132	-0.5566



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.10: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2008 Iwate – Miyagi nairiku earthquake in the six frequency bands (without outliers)

Table.3.7: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2008 Iwate – Miyagi nairiku

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	1.220	-9.379	12.81	-4.907
1.0 – 2.0 Hz	1.407	-6.947	7.499	-2.222
2.0 – 3.0 Hz	0.4426	-1.704	-1.378	2.285
3.0 – 5.0 Hz	0.3417	-1.077	-2.622	3.112
5.0 – 10.0 Hz	0.8077	-4.242	3.046	0.2465
0.1 – 10.0 Hz	0.6447	-6.700	8.593	-2.731

b) σ - β_4 relation

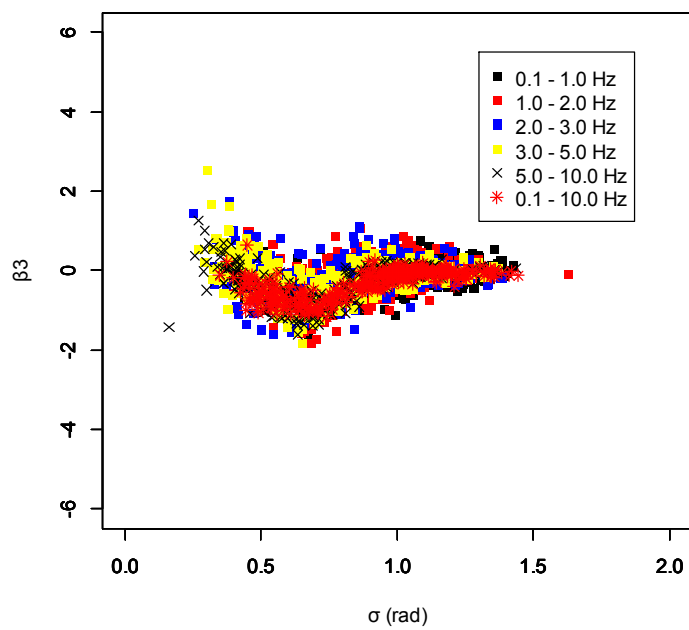
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.759	-3.675
1.0 – 2.0 Hz	7.533	-3.118
2.0 – 3.0 Hz	7.998	-3.403
3.0 – 5.0 Hz	8.438	-3.907
5.0 – 10.0 Hz	8.550	-4.097
0.1 – 10.0 Hz	9.140	-4.591

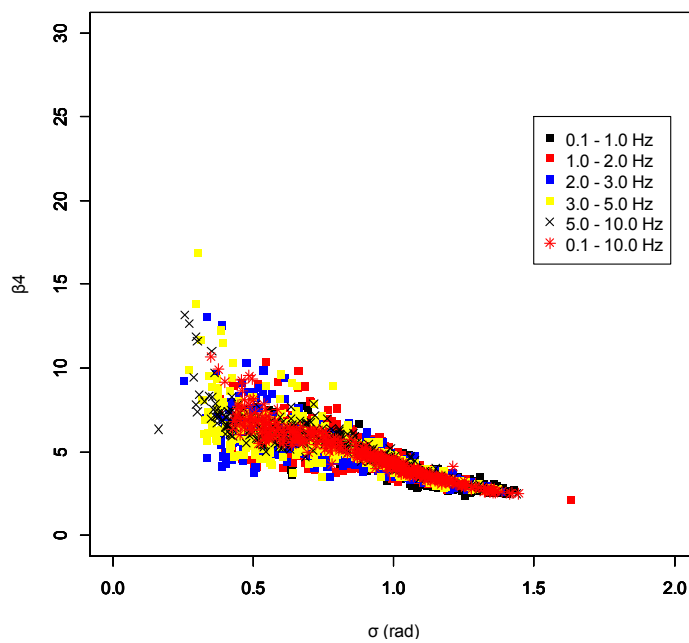
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

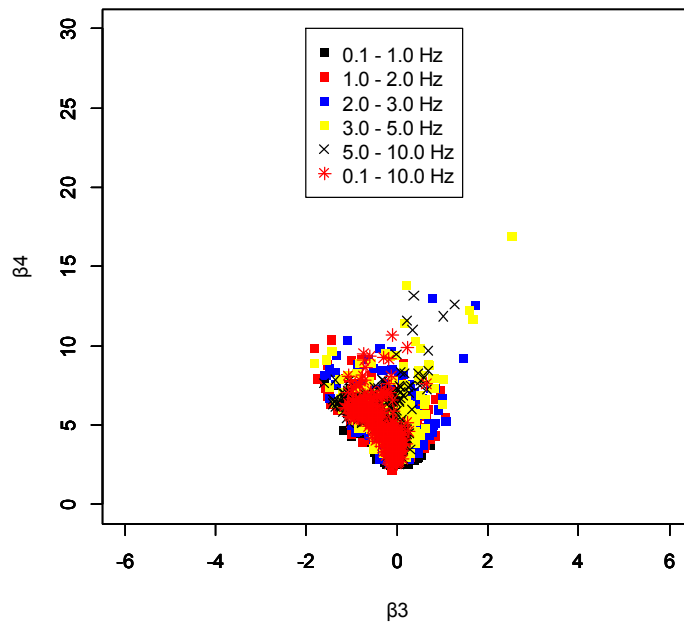
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.703	0.09070	1.636
1.0 – 2.0 Hz	4.821	-0.1175	1.229
2.0 – 3.0 Hz	5.155	-0.07182	1.267
3.0 – 5.0 Hz	5.843	0.7035	1.532
5.0 – 10.0 Hz	6.317	1.022	1.389
0.1 – 10.0 Hz	4.754	-2.877	-0.7639



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.11: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Tokachi oki earthquake in the six frequency bands
(without outliers)

Table.3.8: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Tokachi oki

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	2.452	-11.78	14.29	-5.129
1.0 – 2.0 Hz	4.246	-17.12	19.58	-6.743
2.0 – 3.0 Hz	5.298	-22.59	28.04	-10.71
3.0 – 5.0 Hz	5.796	-23.99	28.44	-10.34
5.0 – 10.0 Hz	4.031	-18.38	22.29	-8.074
0.1 – 10.0 Hz	4.354	-19.68	23.88	-8.710

b) σ - β_4 relation

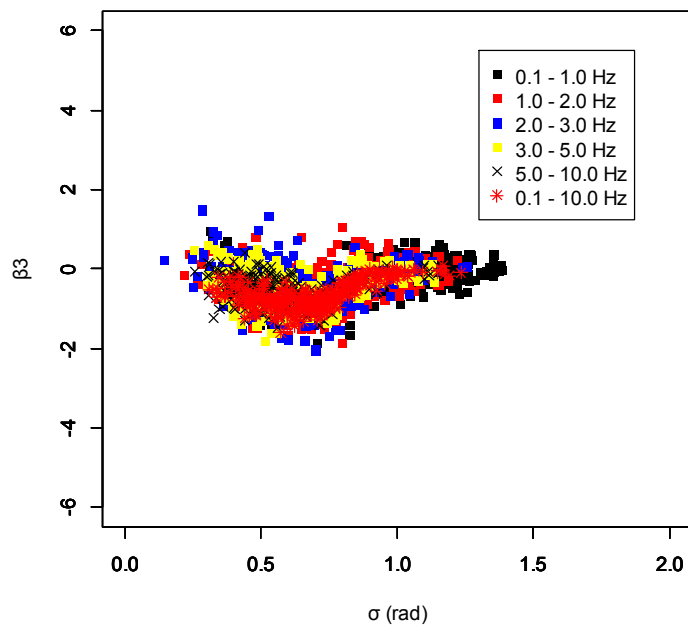
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	8.483	-4.372
1.0 – 2.0 Hz	8.757	-4.376
2.0 – 3.0 Hz	8.854	-4.590
3.0 – 5.0 Hz	9.356	-5.055
5.0 – 10.0 Hz	9.464	-5.088
0.1 – 10.0 Hz	9.676	-5.394

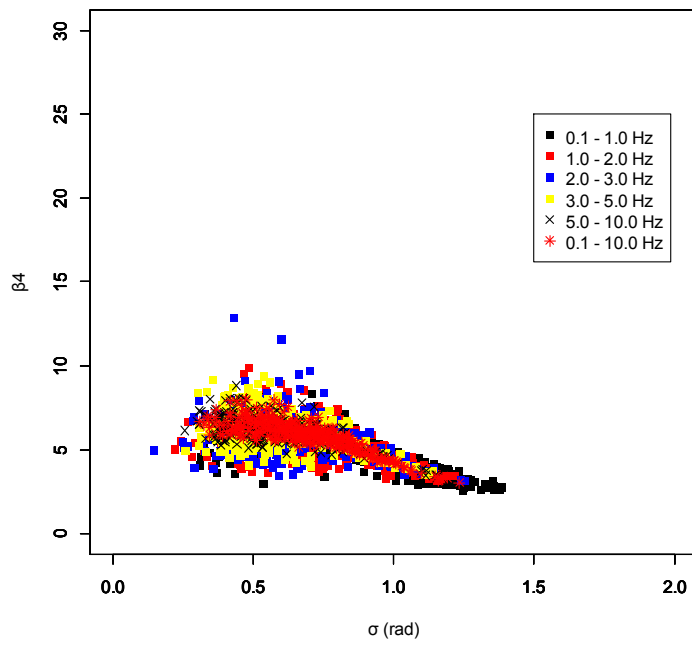
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

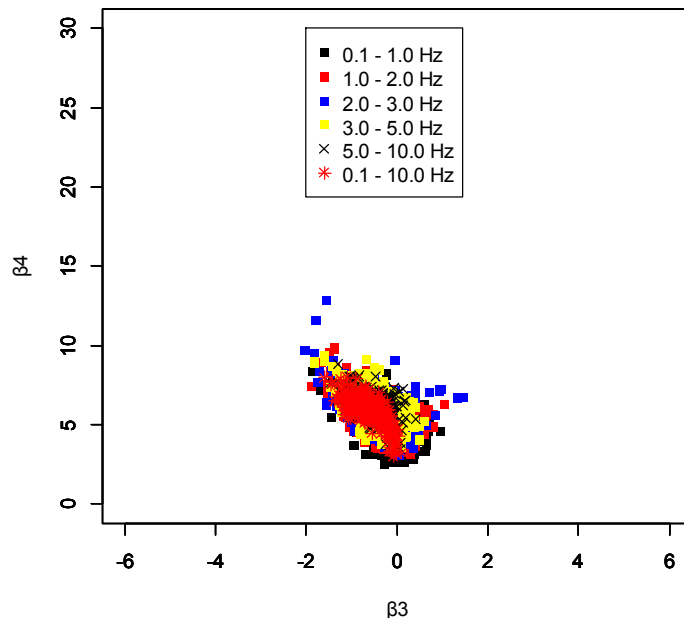
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.356	-0.5622	1.937
1.0 – 2.0 Hz	4.586	-0.5102	1.188
2.0 – 3.0 Hz	4.669	0.02174	1.886
3.0 – 5.0 Hz	4.851	0.5146	1.975
5.0 – 10.0 Hz	4.994	1.365	2.587
0.1 – 10.0 Hz	4.019	-2.364	0.4527



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.12: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Miyagiken oki earthquake in the six frequency bands
(without outliers)

Table.3.9: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2005 Miyagiken oki

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	4.951	-20.90	24.49	-8.753
1.0 – 2.0 Hz	2.541	-12.78	15.88	-5.776
2.0 – 3.0 Hz	2.020	-8.233	7.179	-1.216
3.0 – 5.0 Hz	2.462	-11.44	12.76	-3.970
5.0 – 10.0 Hz	1.518	-7.715	7.990	-2.010
0.1 – 10.0 Hz	4.081	-20.95	27.46	-10.70

b) σ - β_4 relation

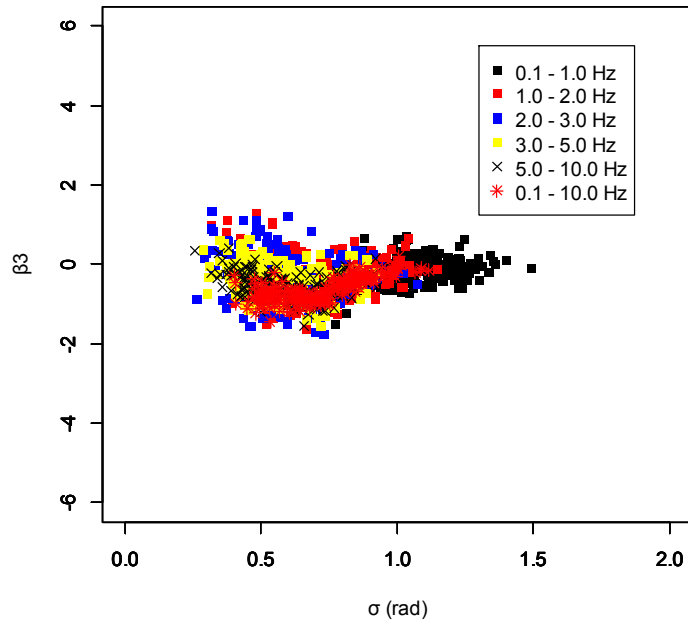
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.337	-3.265
1.0 – 2.0 Hz	7.188	-2.488
2.0 – 3.0 Hz	7.119	-2.174
3.0 – 5.0 Hz	7.833	-3.051
5.0 – 10.0 Hz	7.976	-3.201
0.1 – 10.0 Hz	8.640	-4.058

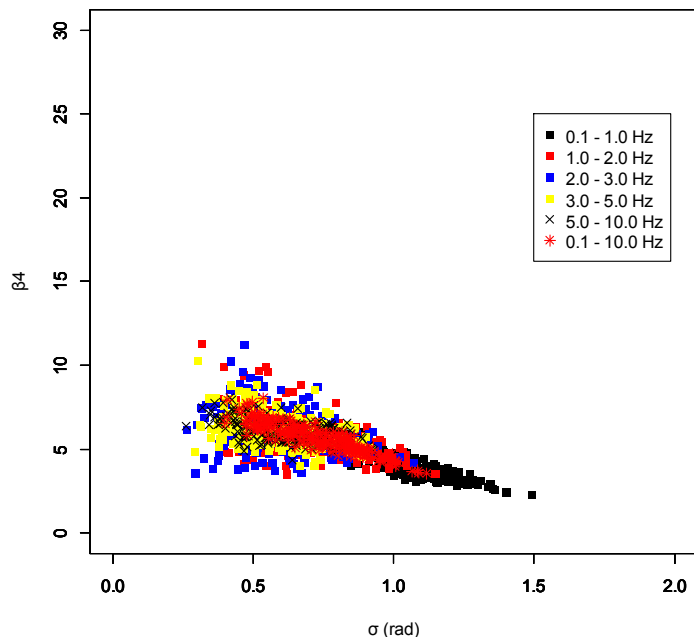
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

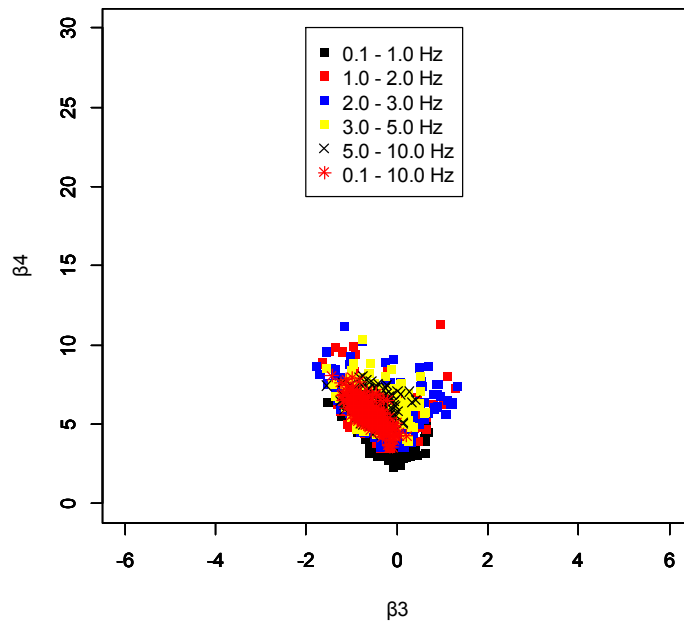
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.675	-0.2144	1.477
1.0 – 2.0 Hz	4.730	-0.2426	1.101
2.0 – 3.0 Hz	5.044	-0.2097	1.171
3.0 – 5.0 Hz	5.382	-0.7551	0.5861
5.0 – 10.0 Hz	5.539	-0.8524	0.2532
0.1 – 10.0 Hz	4.241	-3.423	-1.165



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.13: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2011 Sanriku oki earthquake in the six frequency bands
(without outliers)

Table.3.10: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2011 Sanriku oki

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	-15.49	39.10	-32.87	9.155
1.0 – 2.0 Hz	5.371	-22.18	26.92	-10.18
2.0 – 3.0 Hz	1.057	-2.452	-1.915	3.269
3.0 – 5.0 Hz	-0.1660	3.688	-13.29	10.15
5.0 – 10.0 Hz	1.423	-4.622	-0.8576	4.383
0.1 – 10.0 Hz	5.380	-26.44	35.18	-14.23

b) σ - β_4 relation

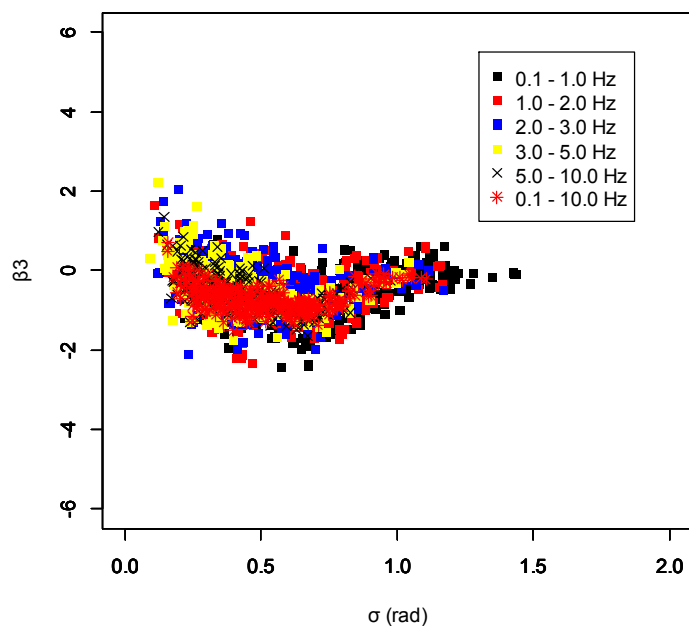
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	8.579	-4.392
1.0 – 2.0 Hz	8.251	-3.671
2.0 – 3.0 Hz	7.289	-2.178
3.0 – 5.0 Hz	7.978	-3.024
5.0 – 10.0 Hz	7.708	-2.643
0.1 – 10.0 Hz	9.249	-4.920

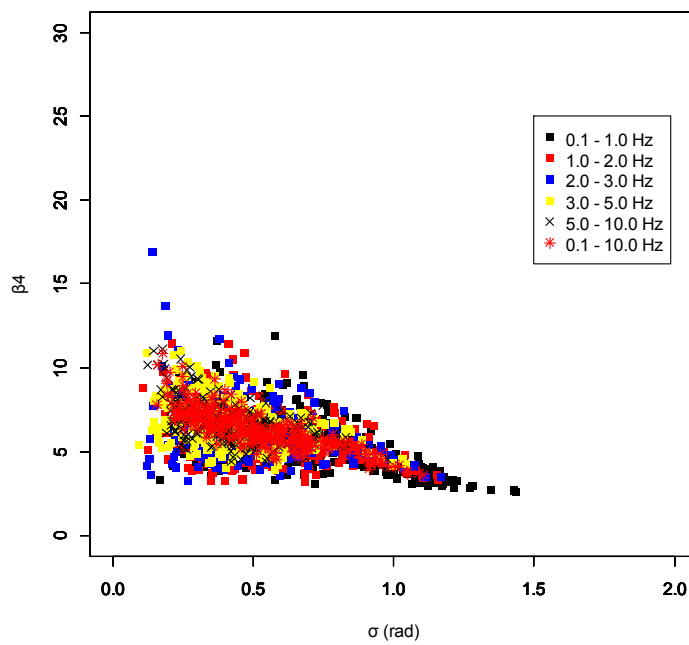
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

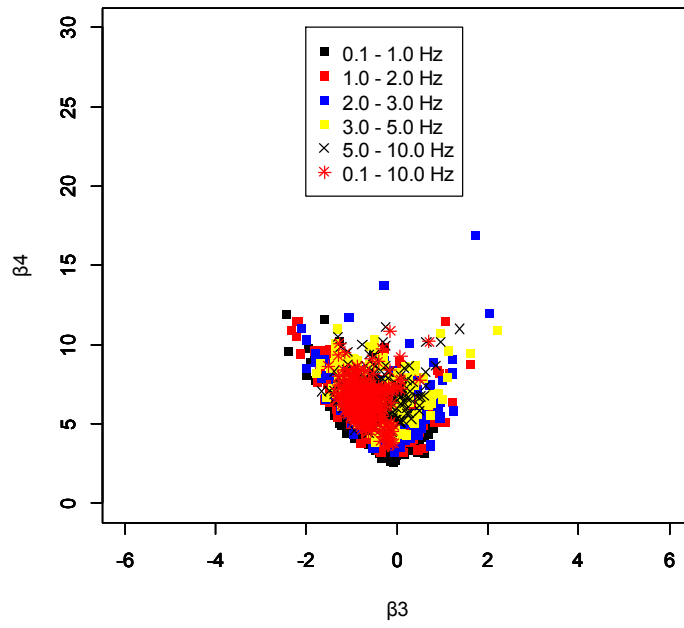
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.638	-0.05429	1.349
1.0 – 2.0 Hz	5.100	0.1571	1.679
2.0 – 3.0 Hz	5.435	0.03730	1.273
3.0 – 5.0 Hz	5.920	-0.01644	0.8344
5.0 – 10.0 Hz	5.987	0.7322	1.137
0.1 – 10.0 Hz	4.388	-1.963	0.1774



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.14: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Geiyo earthquake in the six frequency bands
(without outliers)

Table.3.11: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Geiyo

earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	2.677	-15.23	19.70	-7.358
1.0 – 2.0 Hz	1.934	-10.95	13.73	-4.921
2.0 – 3.0 Hz	1.106	-5.744	5.063	-0.7580
3.0 – 5.0 Hz	1.029	-5.576	3.768	0.5754
5.0 – 10.0 Hz	0.5797	-2.370	-3.492	5.380
0.1 – 10.0 Hz	0.9574	-7.488	8.802	-2.508

b) σ - β_4 relation

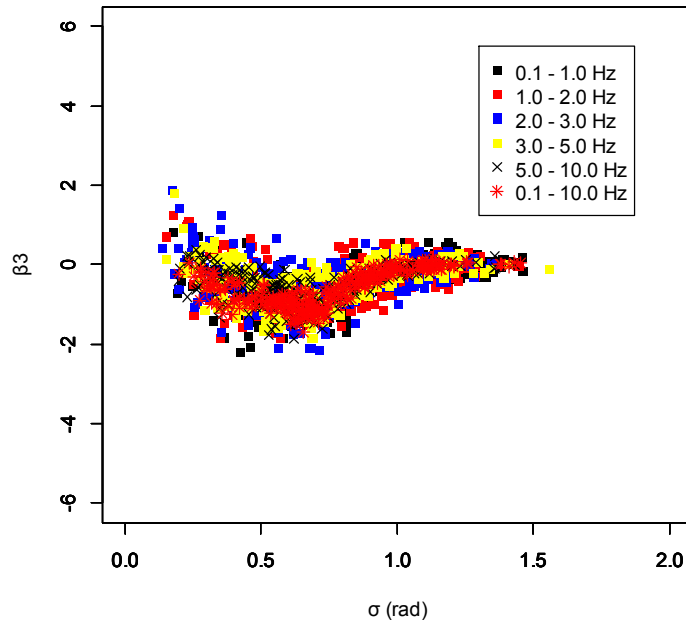
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.575	-3.155
1.0 – 2.0 Hz	7.466	-2.707
2.0 – 3.0 Hz	7.359	-2.494
3.0 – 5.0 Hz	8.052	-3.137
5.0 – 10.0 Hz	8.327	-3.767
0.1 – 10.0 Hz	8.777	-4.680

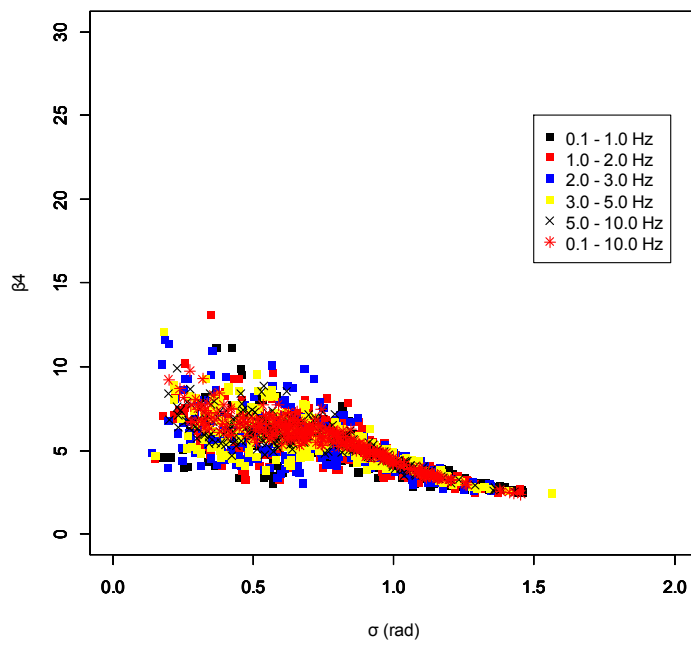
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

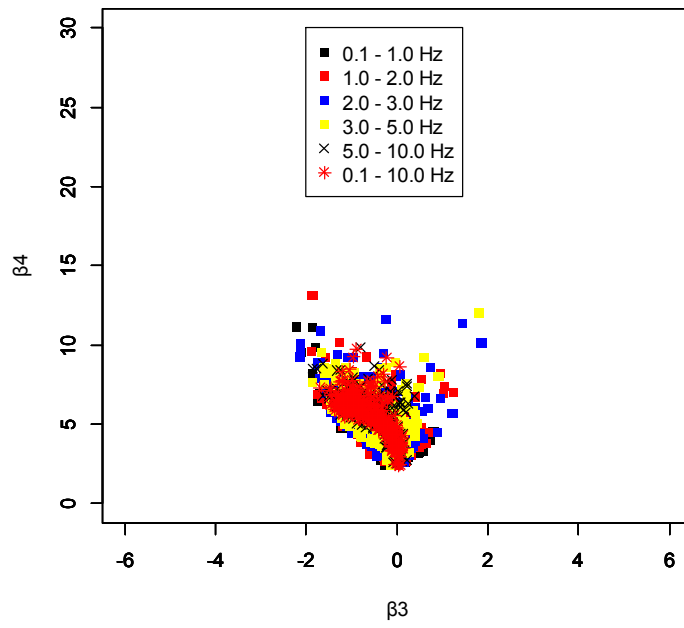
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	4.320	-0.3796	1.084
1.0 – 2.0 Hz	5.122	0.06790	1.233
2.0 – 3.0 Hz	5.387	0.3120	1.464
3.0 – 5.0 Hz	6.134	0.1954	1.117
5.0 – 10.0 Hz	6.699	1.067	1.080
0.1 – 10.0 Hz	6.578	2.334	2.327



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.15: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Iwateken nairikunanbu earthquake in the six frequency bands (without outliers)

Table.3.12: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2001 Iwateken nairikunanbu earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	2.289	-13.71	17.69	-6.528
1.0 – 2.0 Hz	2.830	-15.23	19.45	-7.252
2.0 – 3.0 Hz	2.510	-13.22	16.50	-6.026
3.0 – 5.0 Hz	2.833	-14.93	18.66	-6.751
5.0 – 10.0 Hz	2.323	-12.91	16.16	-5.777
0.1 – 10.0 Hz	2.514	-15.12	19.76	-7.337

b) σ - β_4 relation

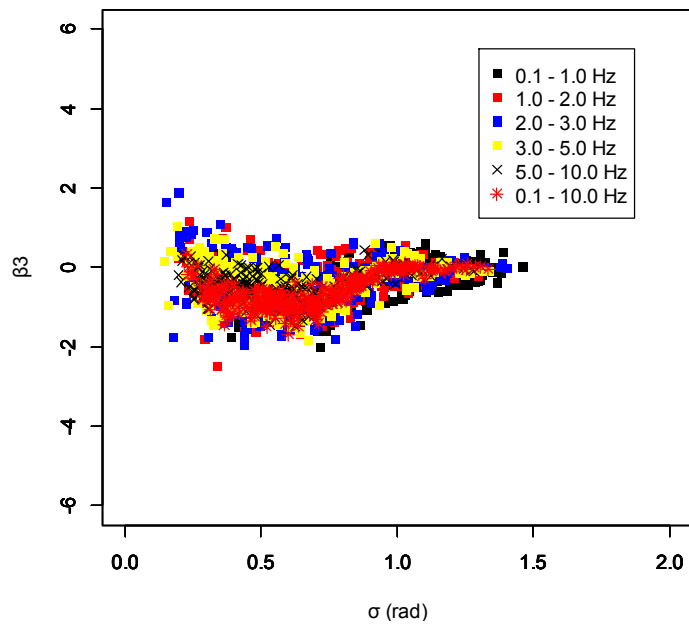
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.787	-3.666
1.0 – 2.0 Hz	8.222	-3.921
2.0 – 3.0 Hz	7.974	-3.574
3.0 – 5.0 Hz	8.396	-3.956
5.0 – 10.0 Hz	8.366	-3.847
0.1 – 10.0 Hz	9.122	-4.670

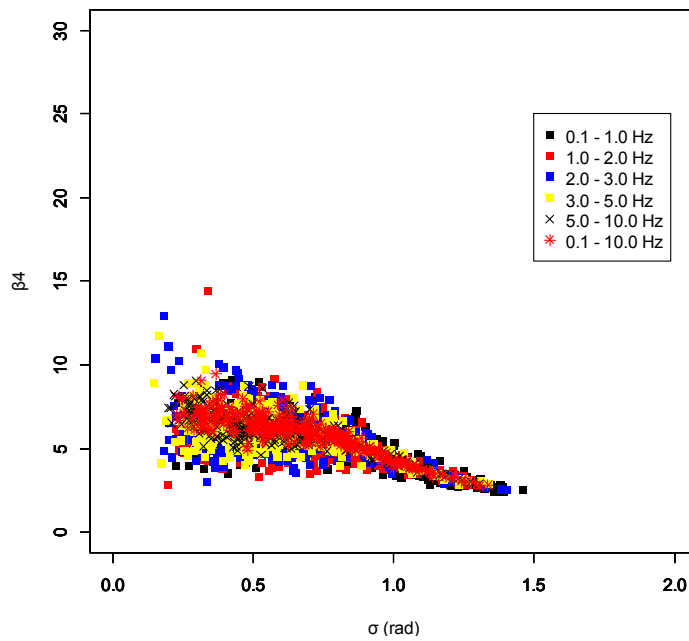
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

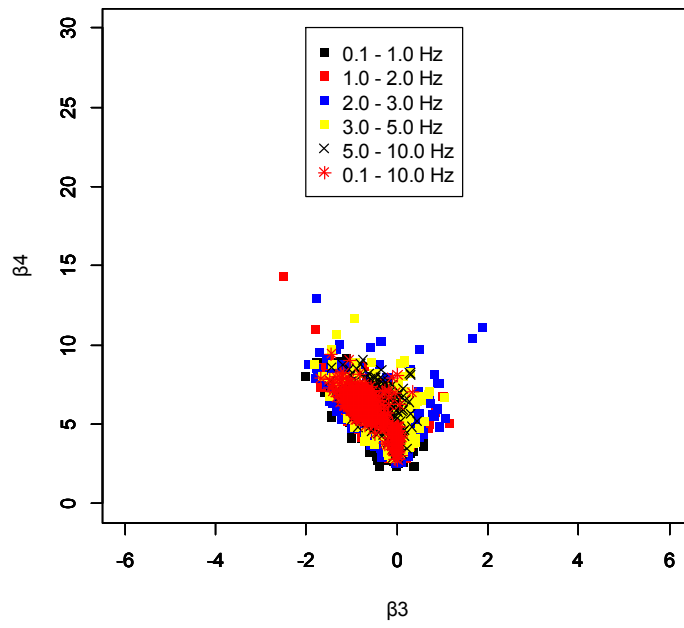
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.576	-0.5750	1.273
1.0 – 2.0 Hz	4.208	0.006282	1.715
2.0 – 3.0 Hz	4.725	0.06840	1.352
3.0 – 5.0 Hz	4.939	0.2727	1.493
5.0 – 10.0 Hz	4.815	-1.919	-0.2037
0.1 – 10.0 Hz	3.967	-4.663	-2.035



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.16: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Miyagiken oki earthquake in the six frequency bands
(without outliers)

Table.3.13: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2003 Miyagiken oki earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	2.438	-14.29	18.71	-7.078
1.0 – 2.0 Hz	1.988	-11.44	15.12	-5.806
2.0 – 3.0 Hz	1.812	-9.909	12.23	-4.359
3.0 – 5.0 Hz	1.648	-9.280	11.68	-4.222
5.0 – 10.0 Hz	1.346	-8.651	11.14	-4.001
0.1 – 10.0 Hz	2.395	-15.13	20.79	-8.170

b) σ - β_4 relation

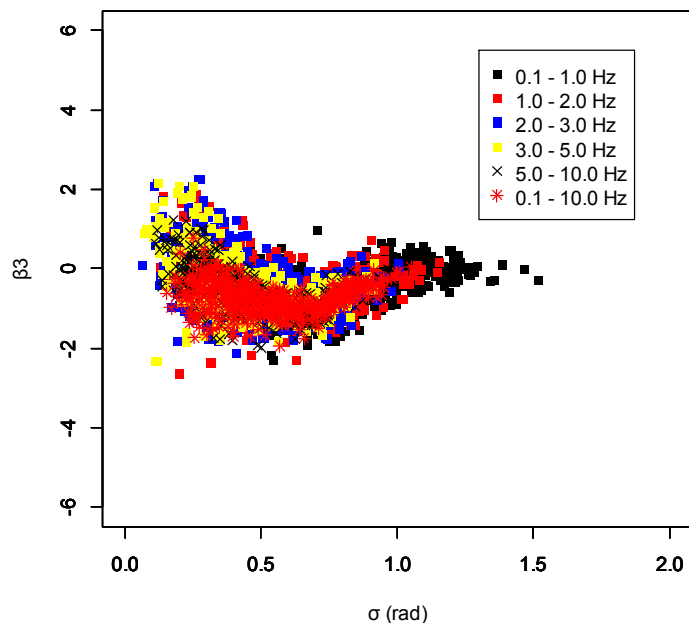
$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.966	-3.781
1.0 – 2.0 Hz	7.449	-3.044
2.0 – 3.0 Hz	7.689	-3.108
3.0 – 5.0 Hz	7.824	-3.329
5.0 – 10.0 Hz	8.274	-3.789
0.1 – 10.0 Hz	8.728	-4.227

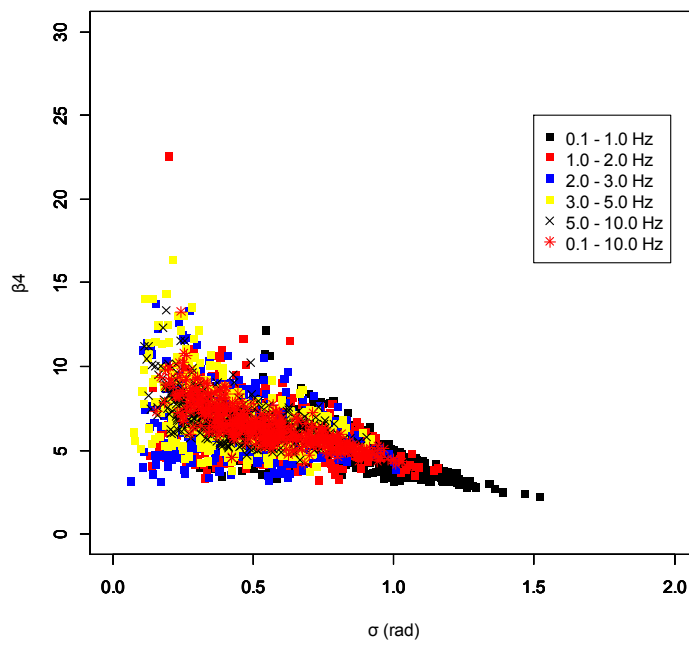
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

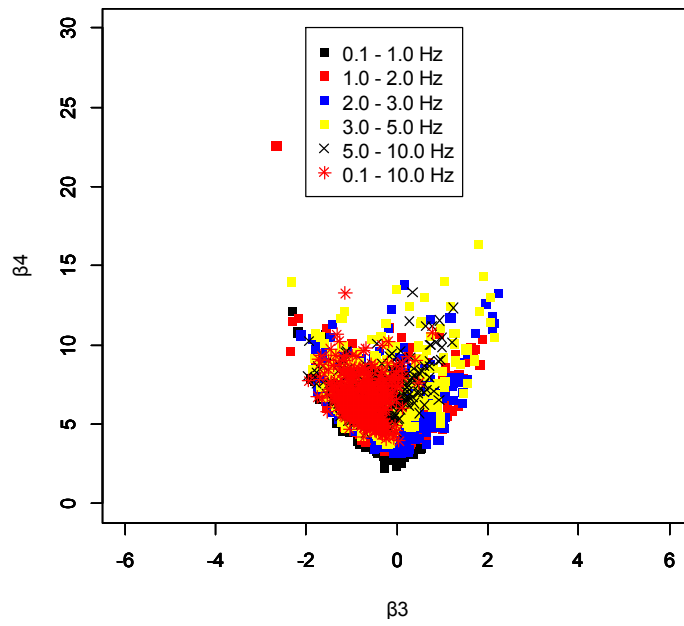
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	3.674	-0.6960	1.275
1.0 – 2.0 Hz	4.485	-0.4650	1.335
2.0 – 3.0 Hz	4.959	0.01516	1.468
3.0 – 5.0 Hz	5.329	-0.1217	1.274
5.0 – 10.0 Hz	5.298	-1.522	-0.04246
0.1 – 10.0 Hz	4.399	-2.810	-0.5064



a) σ - β_3 relation



b) σ - β_4 relation



c) β_3 - β_4 relation

Fig.3.17: relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2009 Surugawan earthquake in the six frequency bands (without outliers)

Table.3.14: regression coefficients for relations of σ and β_3 , σ and β_4 and β_3 and β_4 in 2009 Surugawan earthquake in the six frequency bands (without outliers)

a) σ - β_3 relation

$$\beta_3 = a1 + a2 * \sigma + a3 * \sigma^2 + a4 * \sigma^3$$

	$a1$	$a2$	$a3$	$a4$
0.1 – 1.0 Hz	2.918	-14.61	17.85	-6.388
1.0 – 2.0 Hz	1.768	-7.911	6.884	-0.9569
2.0 – 3.0 Hz	0.7109	-0.7255	-7.503	7.619
3.0 – 5.0 Hz	0.9881	-2.695	-5.187	7.259
5.0 – 10.0 Hz	0.6367	-1.064	-8.448	9.346
0.1 – 10.0 Hz	-0.3328	0.2060	-5.234	5.350

b) σ - β_4 relation

$$\beta_4 = a5 + a6 * \sigma$$

	$a5$	$a6$
0.1 – 1.0 Hz	7.901	-3.555
1.0 – 2.0 Hz	7.637	-2.902
2.0 – 3.0 Hz	7.431	-2.331
3.0 – 5.0 Hz	8.808	-4.336
5.0 – 10.0 Hz	8.734	-4.242
0.1 – 10.0 Hz	9.317	-5.165

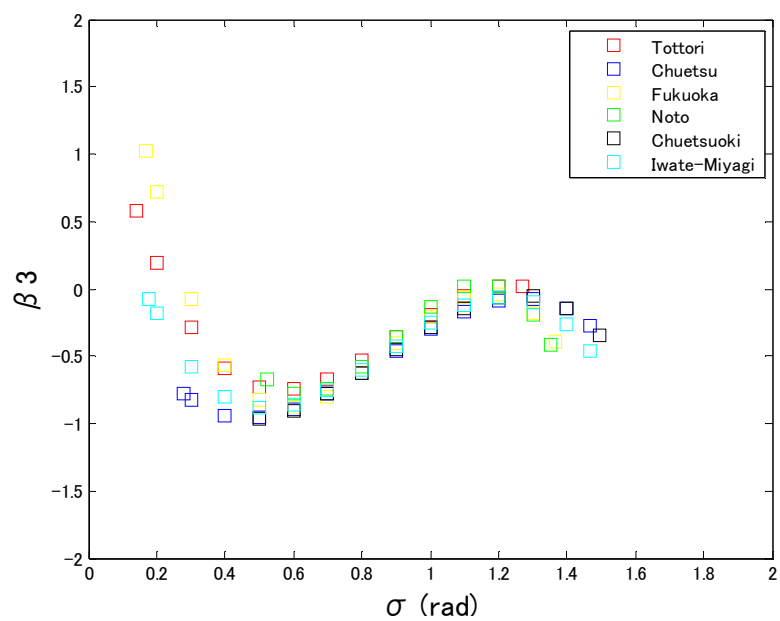
c) β_3 - β_4 relation

$$\beta_4 = a7 + a8 * \beta_3 + a9 * \beta_3^2$$

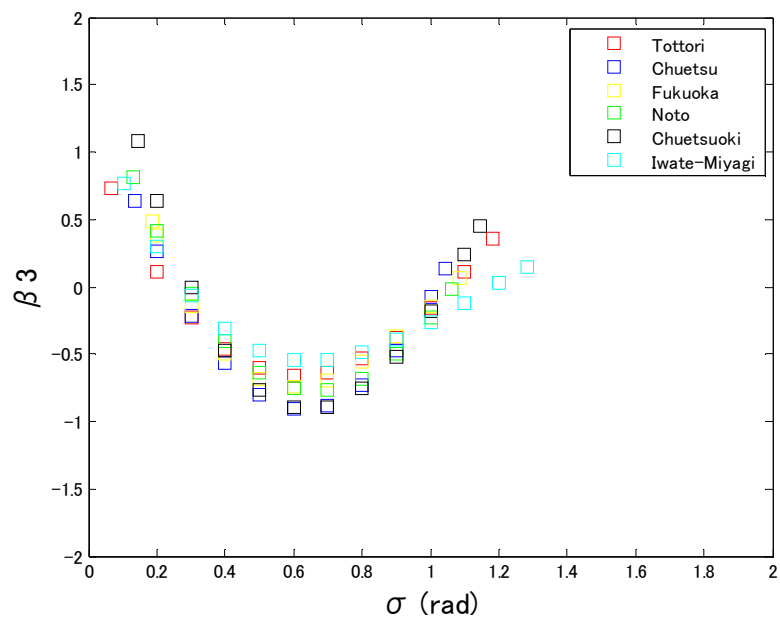
	$a7$	$a8$	$a9$
0.1 – 1.0 Hz	4.183	-0.4334	1.071
1.0 – 2.0 Hz	5.278	0.3235	1.364
2.0 – 3.0 Hz	5.576	0.1956	1.174
3.0 – 5.0 Hz	6.429	0.8418	1.167
5.0 – 10.0 Hz	6.916	1.770	1.332
0.1 – 10.0 Hz	6.845	2.374	2.015

以上, 各地震について帯域毎に, 外れ値を含まない場合の σ と β_3 , σ と β_4 , および β_3 と β_4 の関係を調べた. 著者は地震間でこれら統計量の関係がどの程度異なるのか見るために, 地震を直下型, プレート境界, スラブ内に分類し, 各々のタイプ毎に結果を重ね描きした. Fig.3.18, Fig.3.19, Fig.3.20 に全ての直下型地震の平均的な σ と β_3 , σ と β_4 , そして β_3 と β_4 の関係を 6 つの帯域毎にそれぞれ示す. 同様に Fig.3.21, Fig.3.22, Fig.3.23 に全てのプレート境界地震の平均的な σ と β_3 , σ と β_4 , そして β_3 と β_4 の関係を, Fig.3.24, Fig.3.25, Fig.3.26 に全てのスラブ内地震の平均的な σ と β_3 , σ と β_4 , および β_3 と β_4 の関係を示す. これらの図から, どの地震においても σ が 0.6 あるいは 0.7 程度の時に β_3 は最小になるという共通の傾向があると分かる. また全ての地震において, σ と β_4 の関係は類似している. しかしこういった傾向の共通点があっても, 個々の地震間で差が大きな帯域が見られる. 特に σ が小さい場合の β_3 の値は地震間の差が著しい. また地震のマグニチュードや深さの違いに起因すると思われる系統的な差は認められなかった.

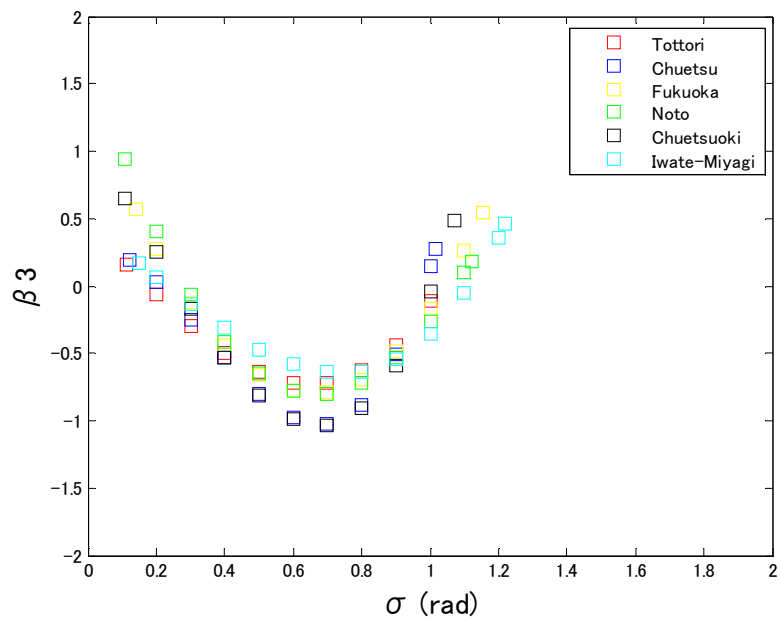
こういったことから判断するに, 位相差分の σ と β_3 や σ と β_4 の関係は地震毎, また周波数帯域毎に別個に定義されるべきであると考えられる.



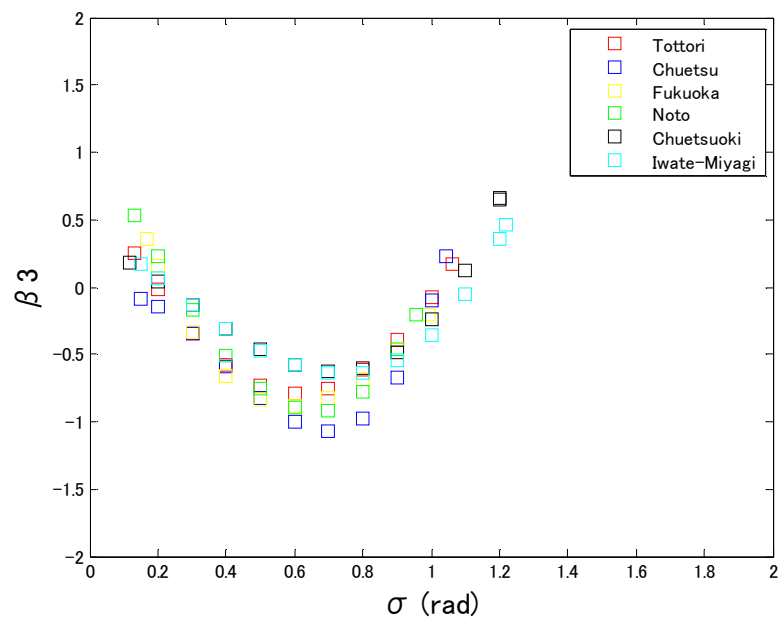
a) 0.1-1.0 Hz



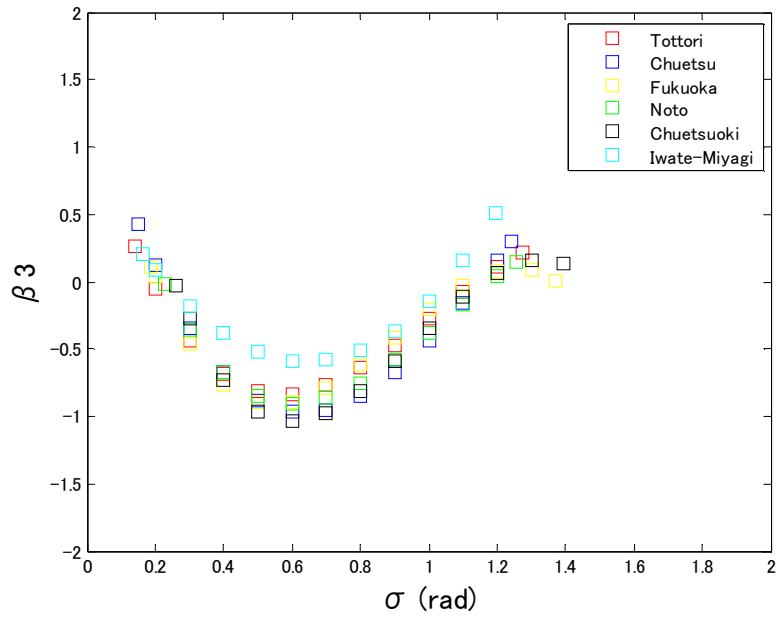
b) 1.0-2.0 Hz



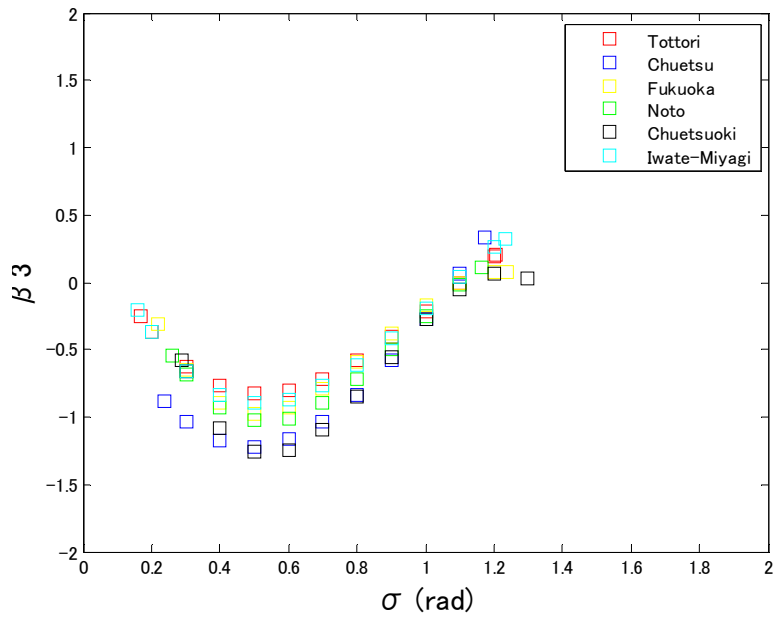
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

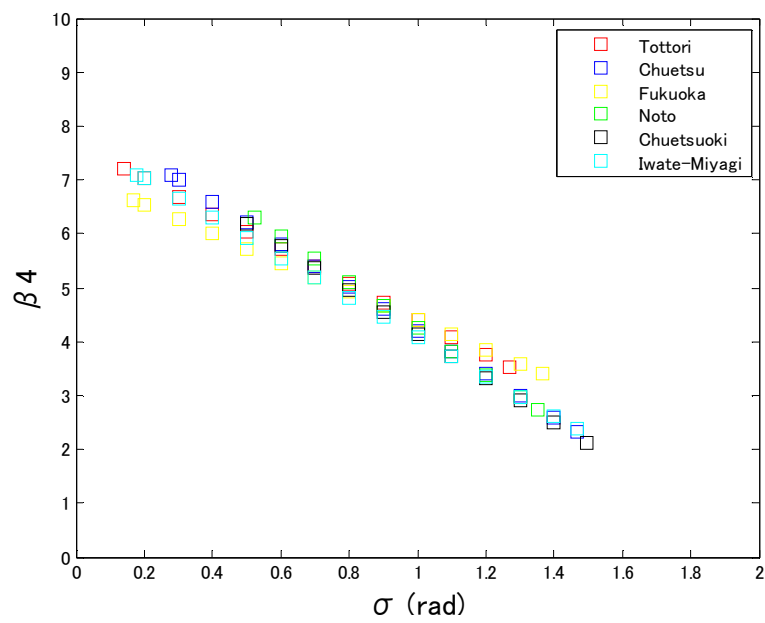


e) 5.0-10.0 Hz

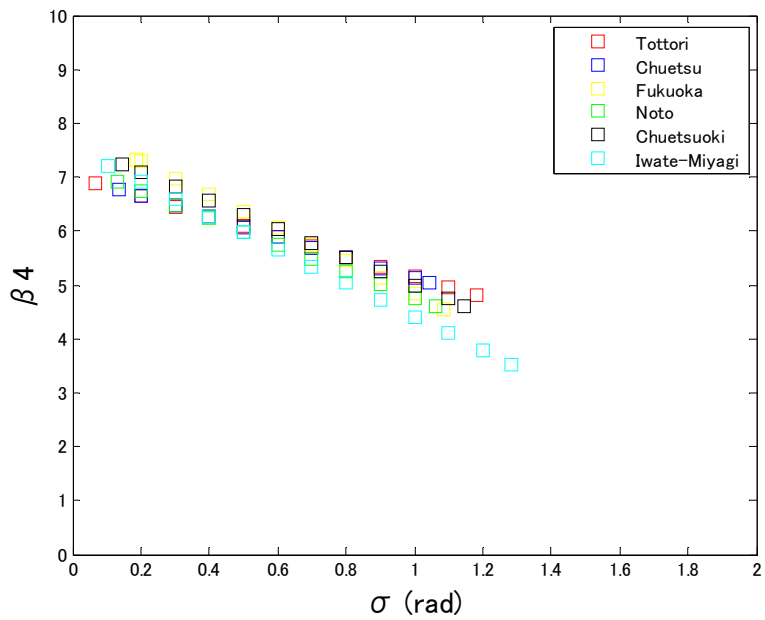


f) 0.1-10.0 Hz

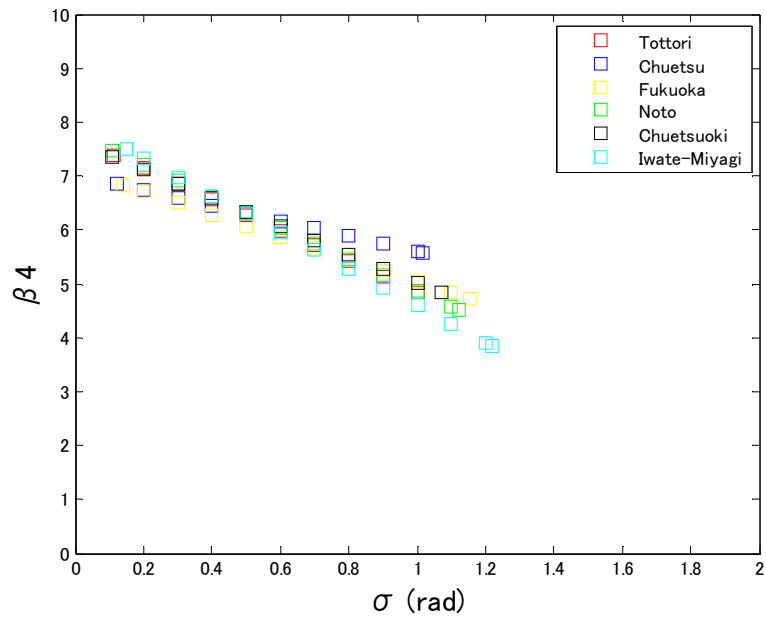
Fig.3.18: average relations of σ and β_3 in all of the crustal earthquakes in each frequency band



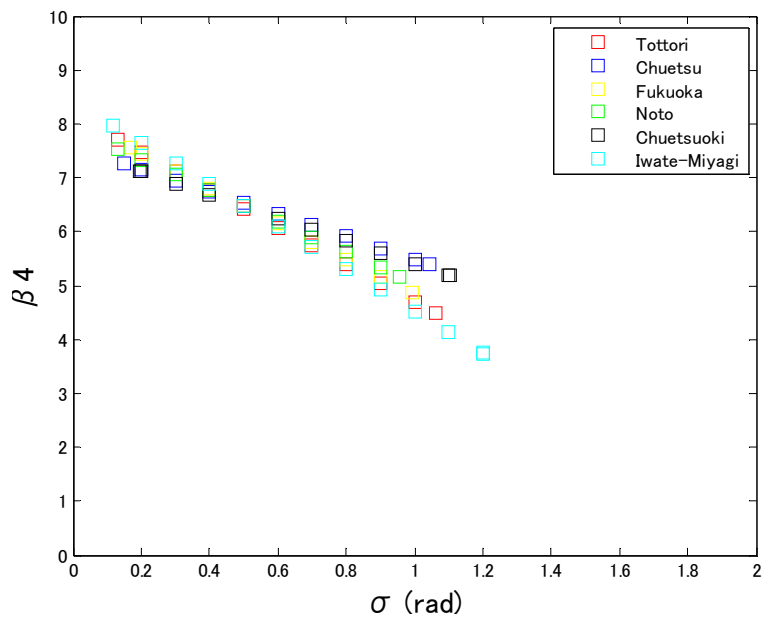
a) 0.1-1.0 Hz



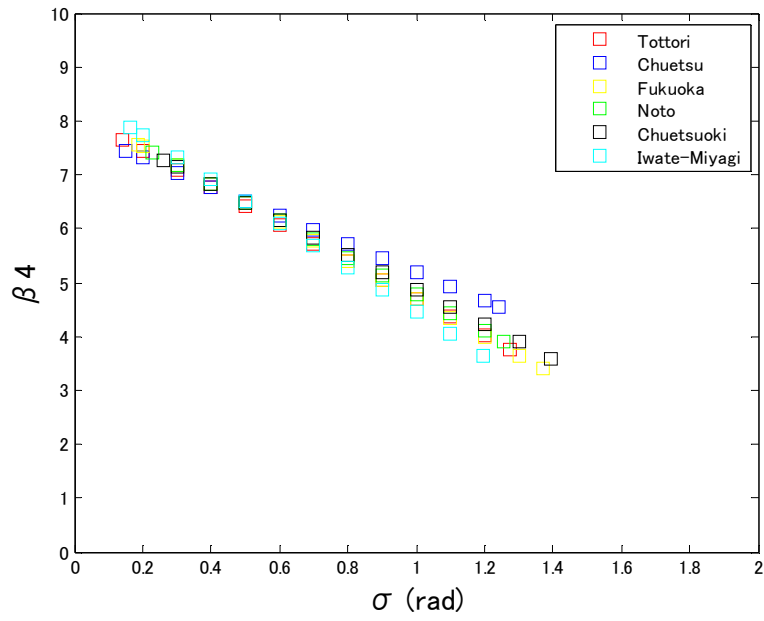
b) 1.0-2.0 Hz



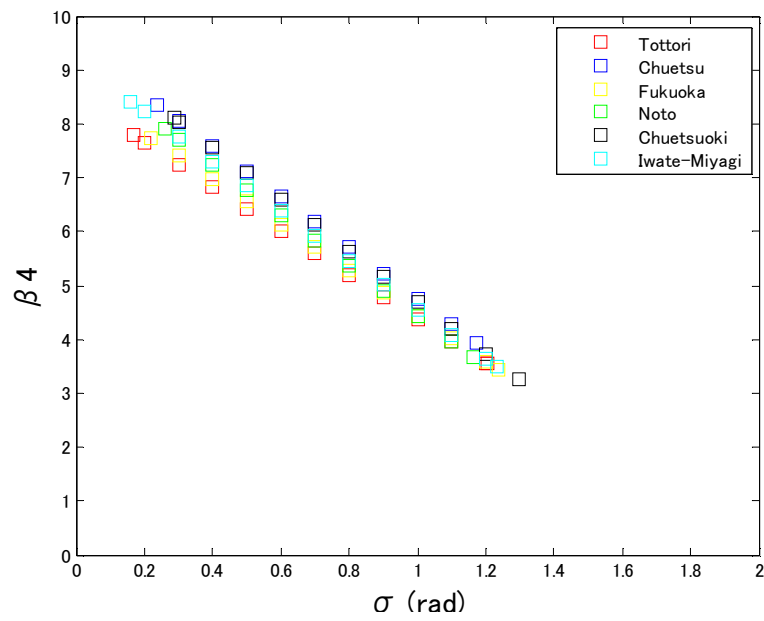
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

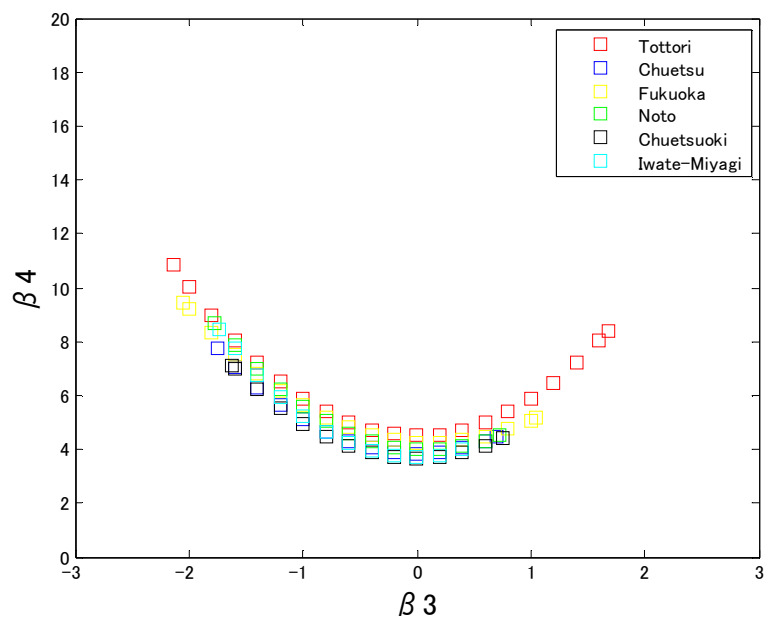


e) 5.0-10.0 Hz

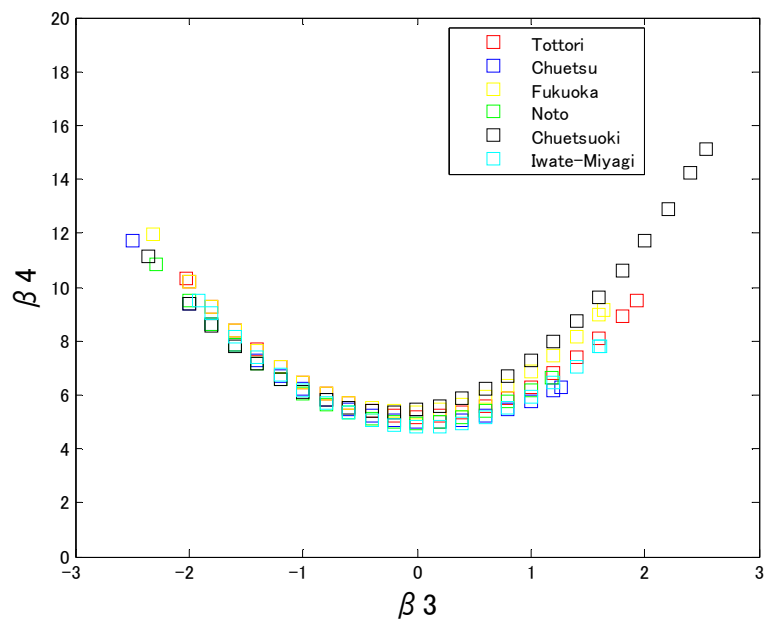


f) 0.1-10.0 Hz

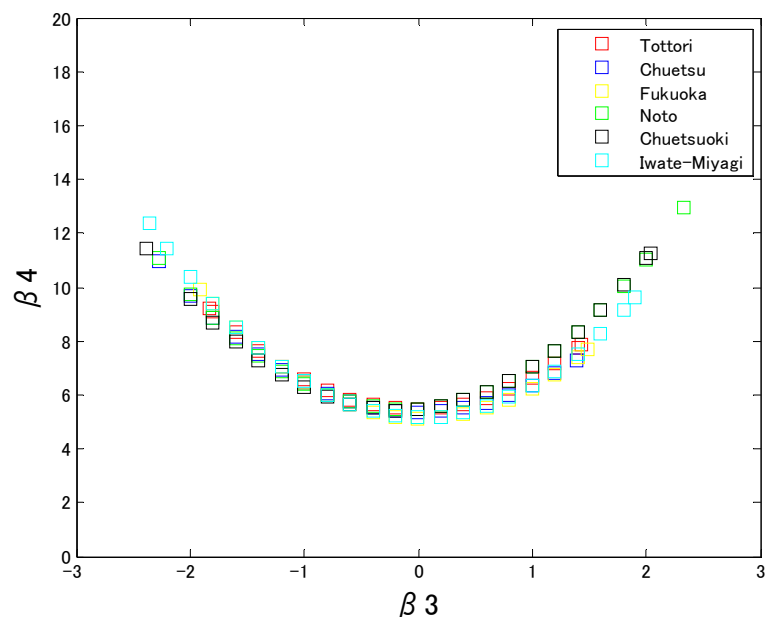
Fig.3.19: average relations of σ and β_4 in all of the crustal earthquakes in each frequency band



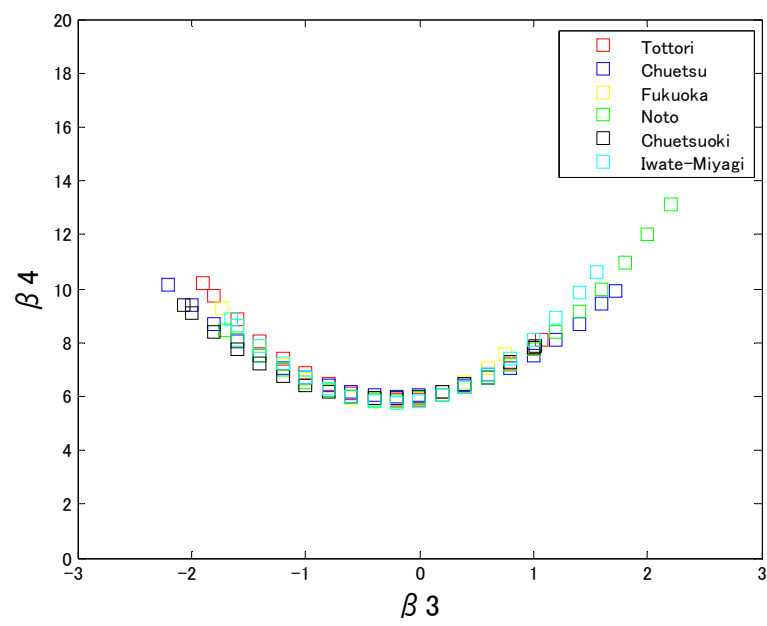
a) 0.1-1.0 Hz



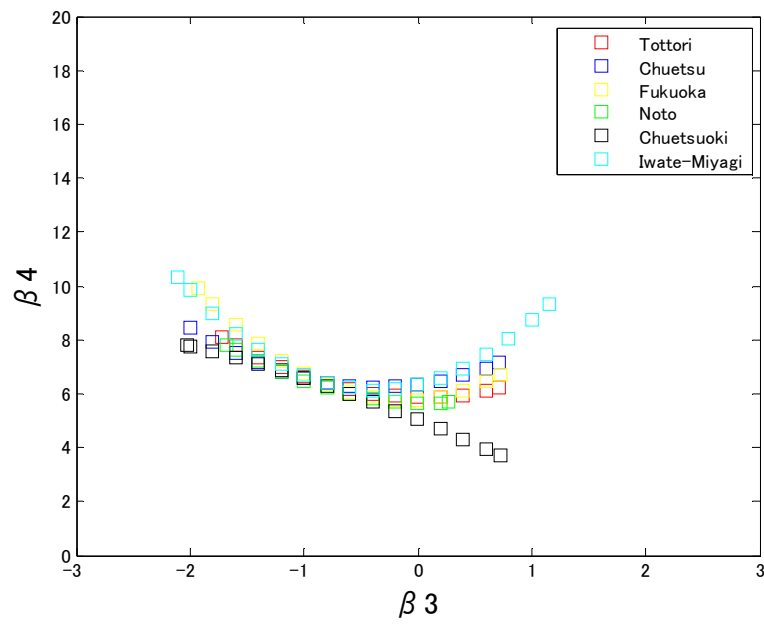
b) 1.0-2.0 Hz



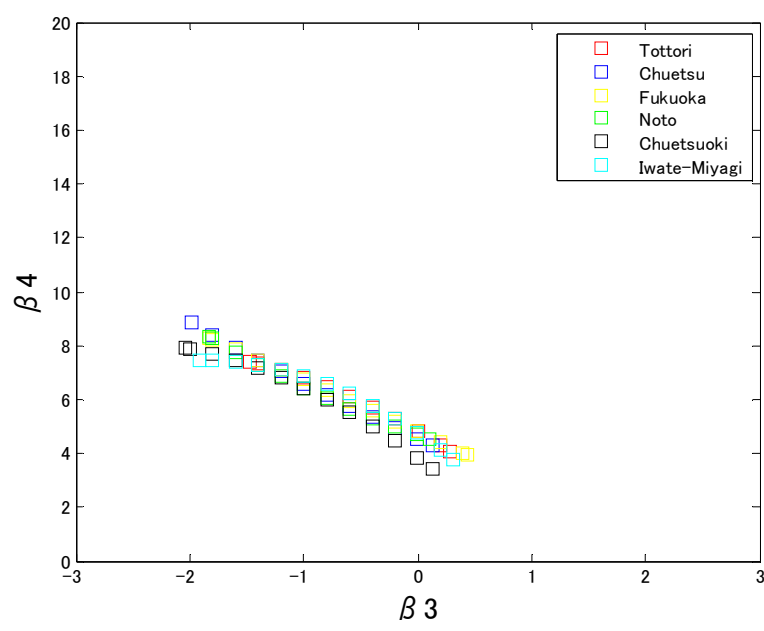
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

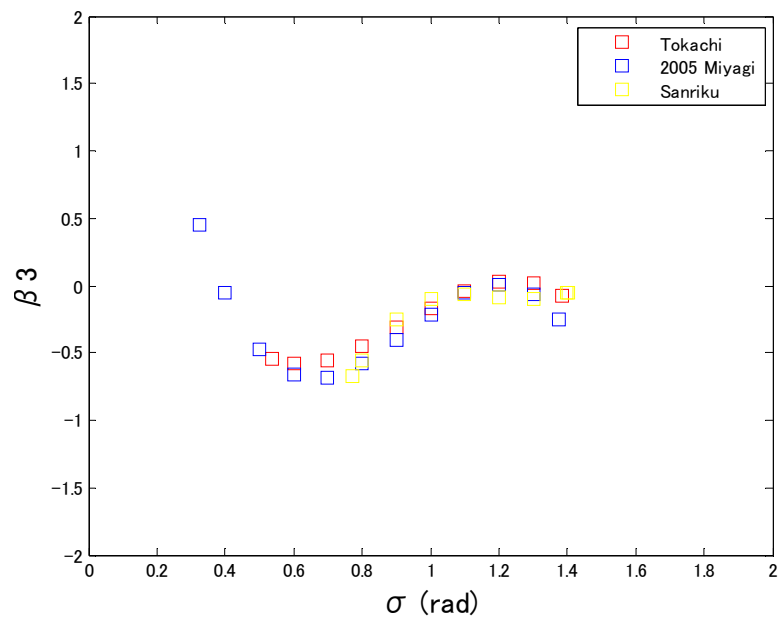


e) 5.0-10.0 Hz

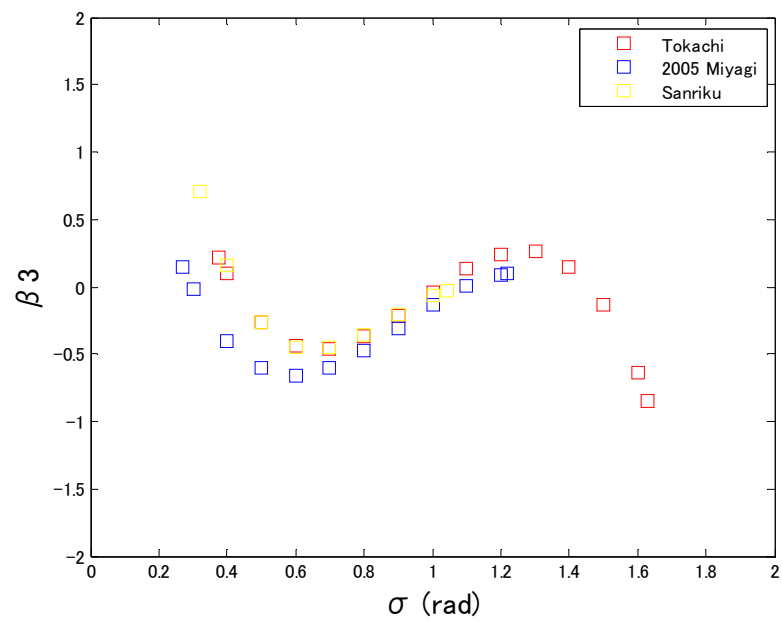


f) 0.1-10.0 Hz

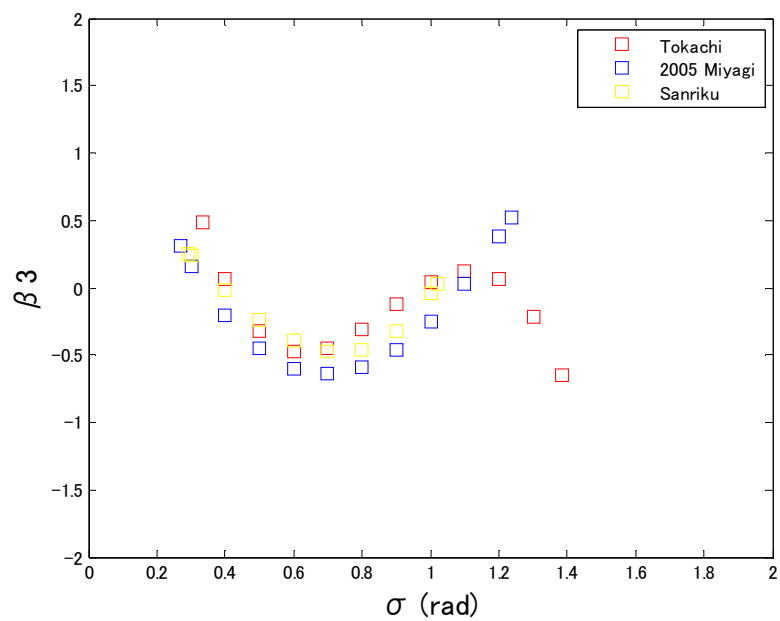
Fig.3.20: average relations of β_3 and β_4 in all of the crustal earthquakes in each frequency band



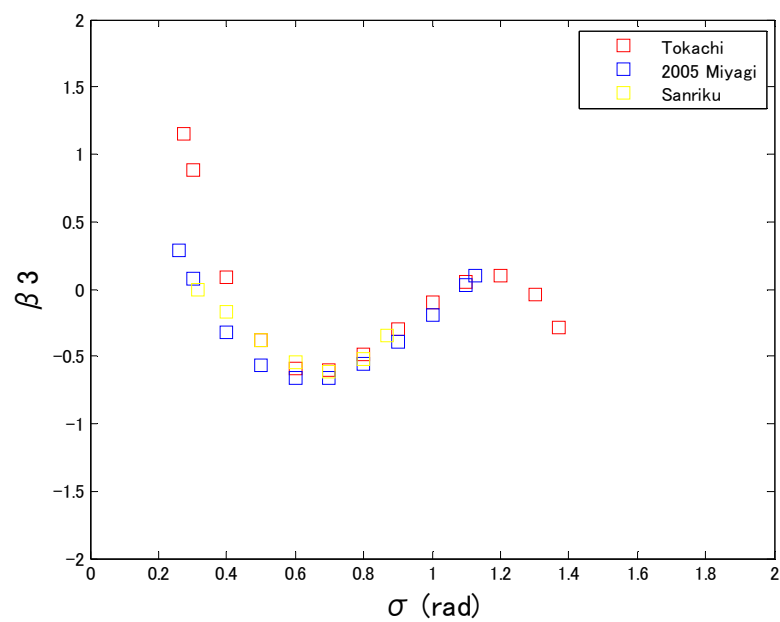
a) 0.1-1.0 Hz



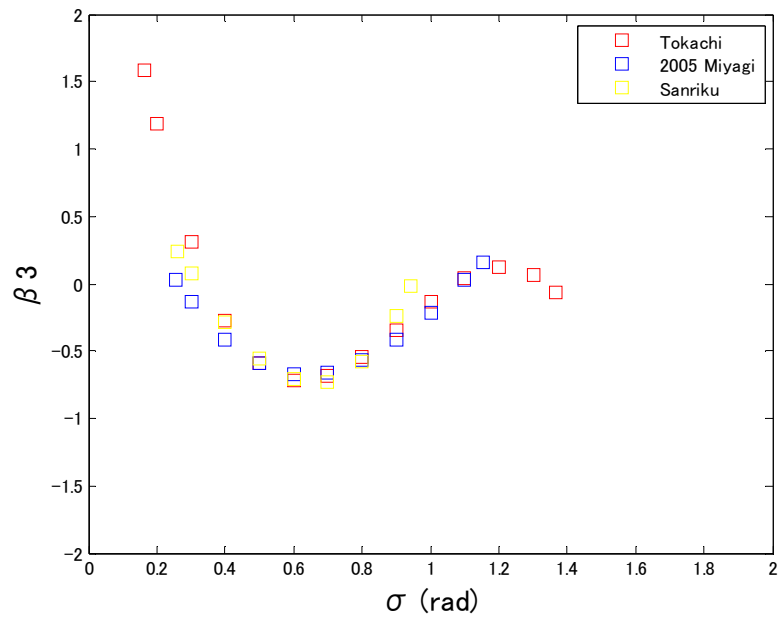
b) 1.0-2.0 Hz



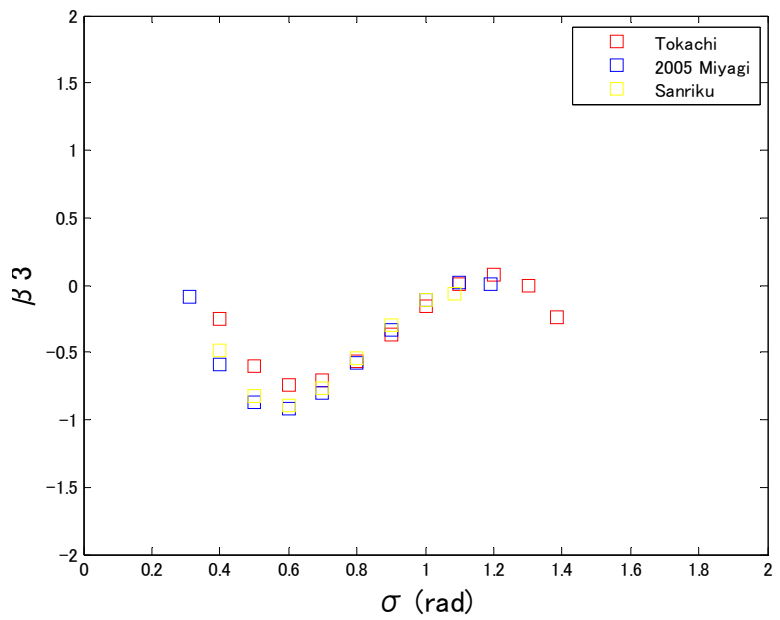
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

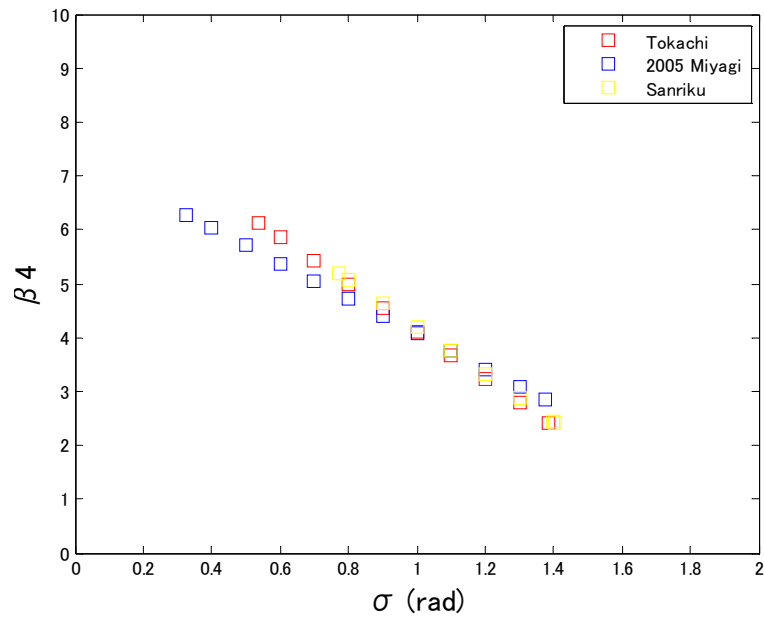


e) 5.0-10.0 Hz

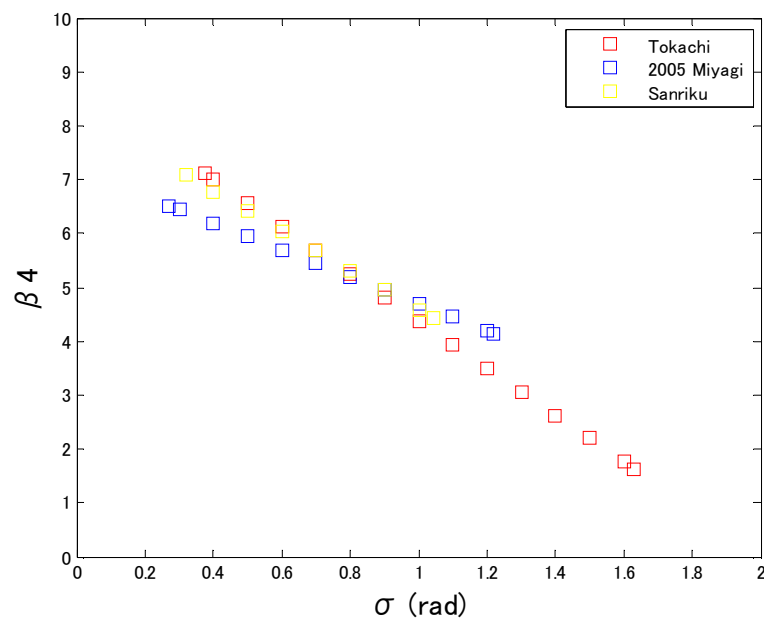


f) 0.1-10.0 Hz

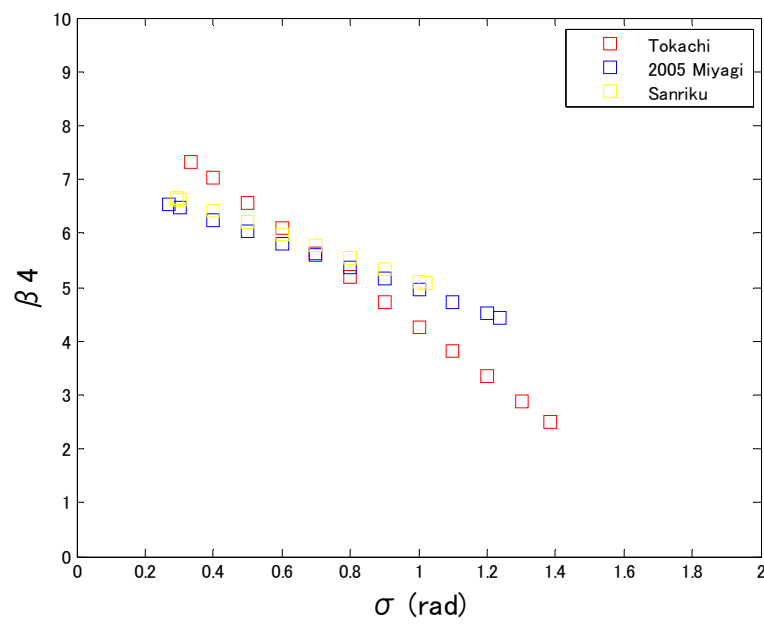
Fig.3.21: average relations of σ and β_3 in all of the interface earthquakes in each frequency band



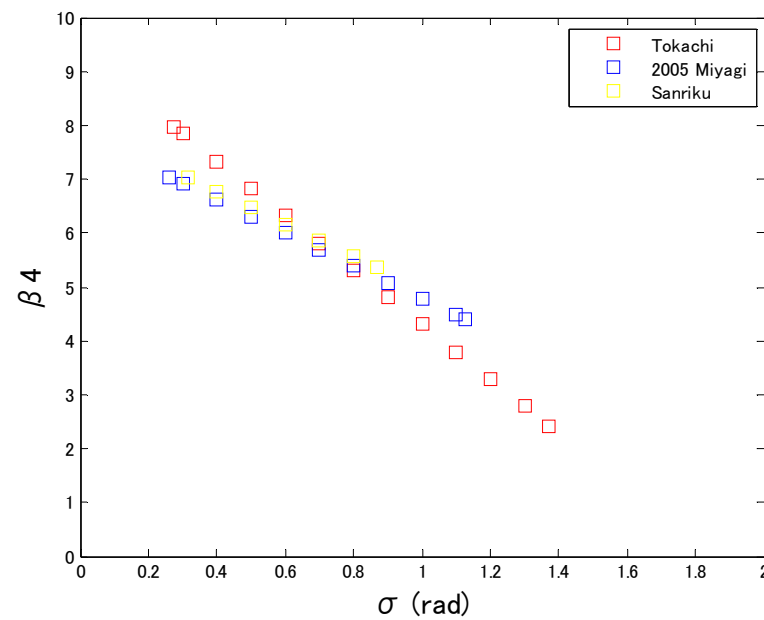
a) 0.1-1.0 Hz



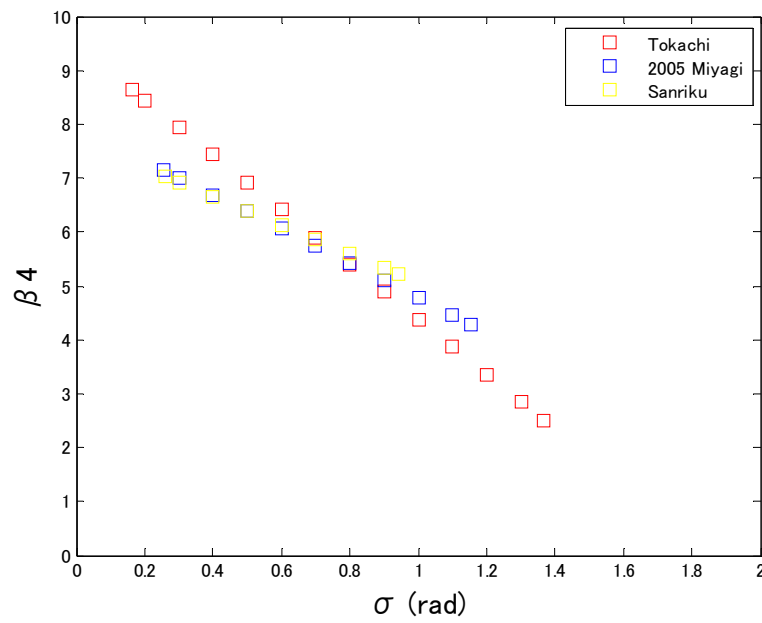
b) 1.0-2.0 Hz



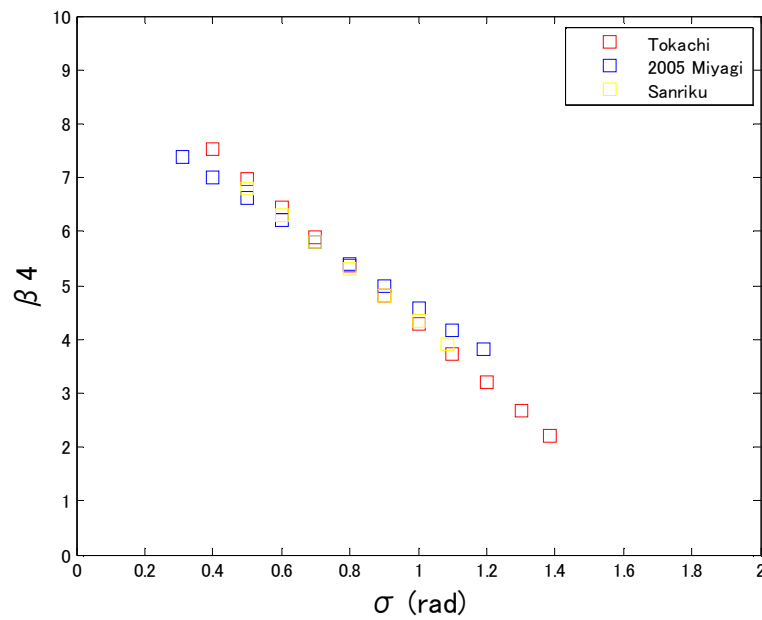
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

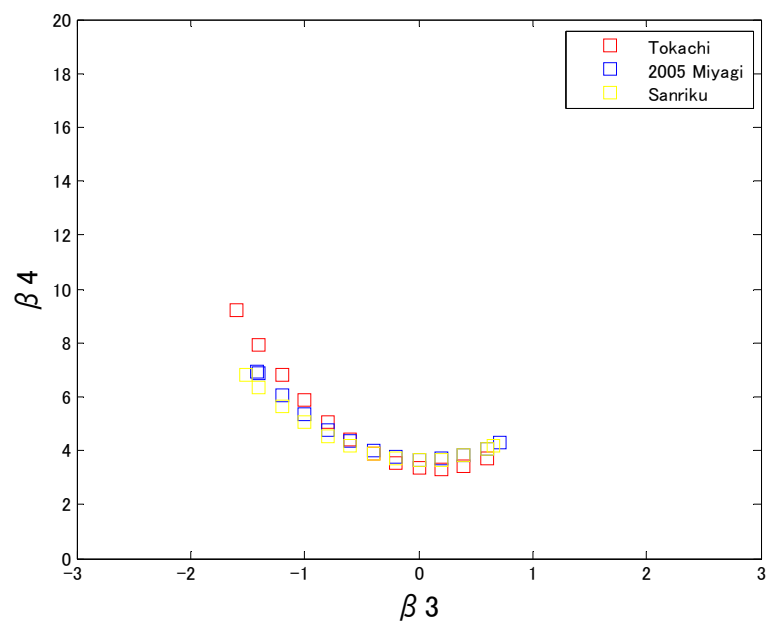


e) 5.0-10.0 Hz

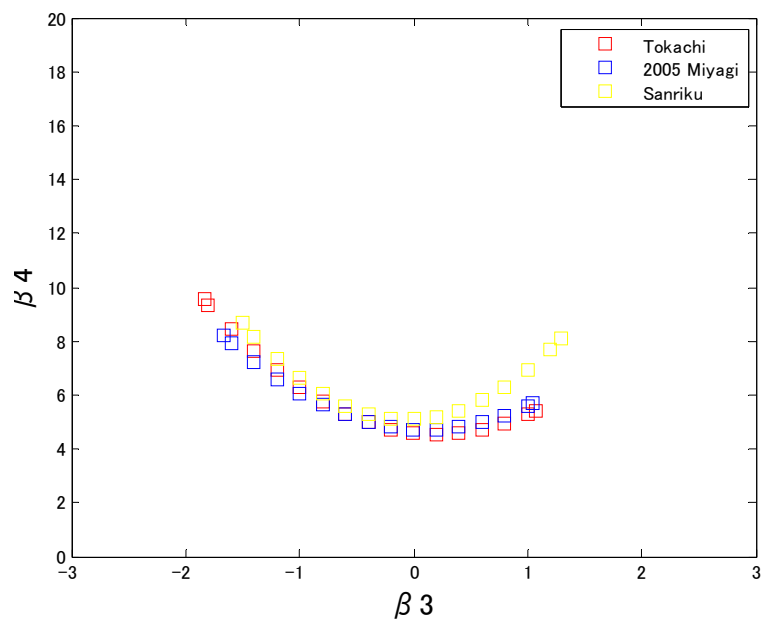


f) 0.1-10.0 Hz

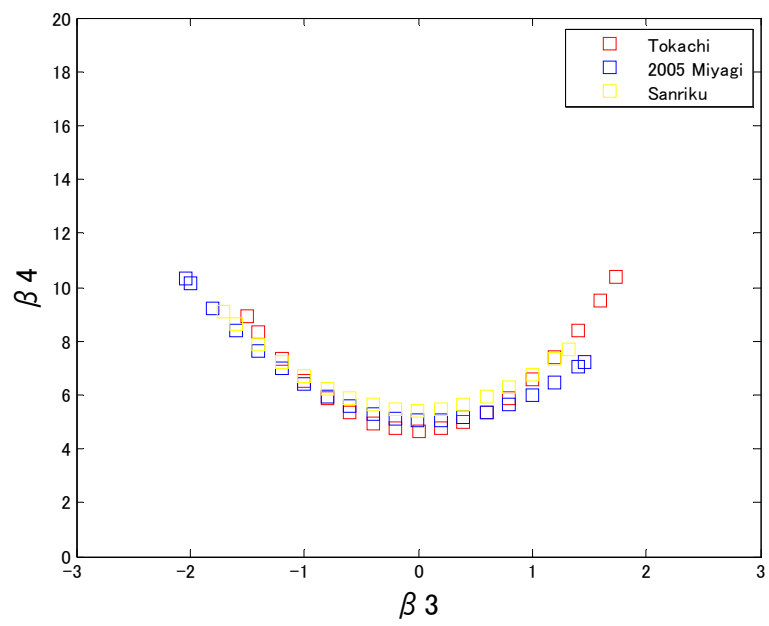
Fig.3.22: average relations of σ and β_4 in all of the interface earthquakes in each frequency band



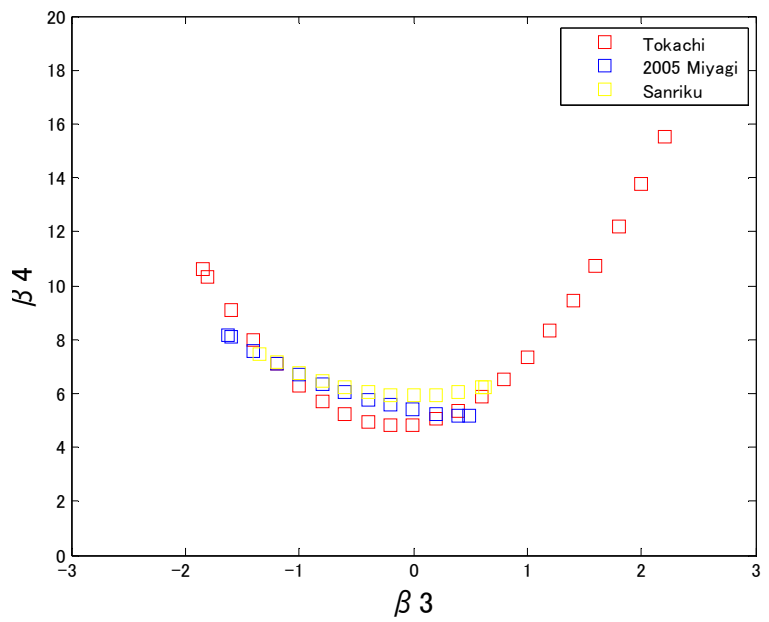
a) 0.1-1.0 Hz



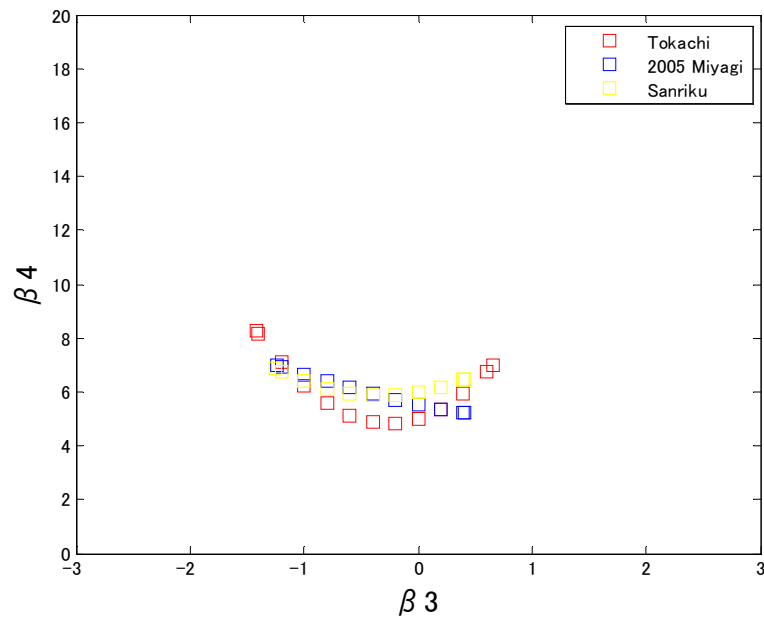
b) 1.0-2.0 Hz



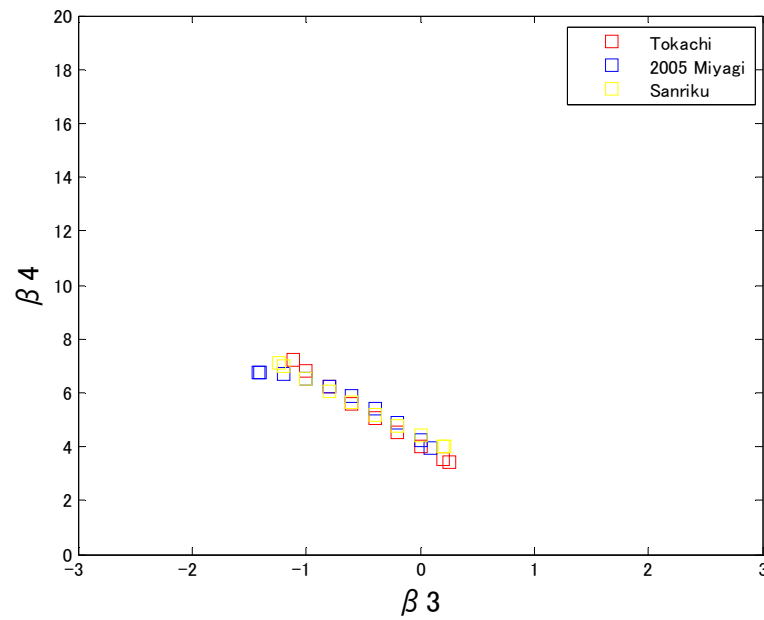
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

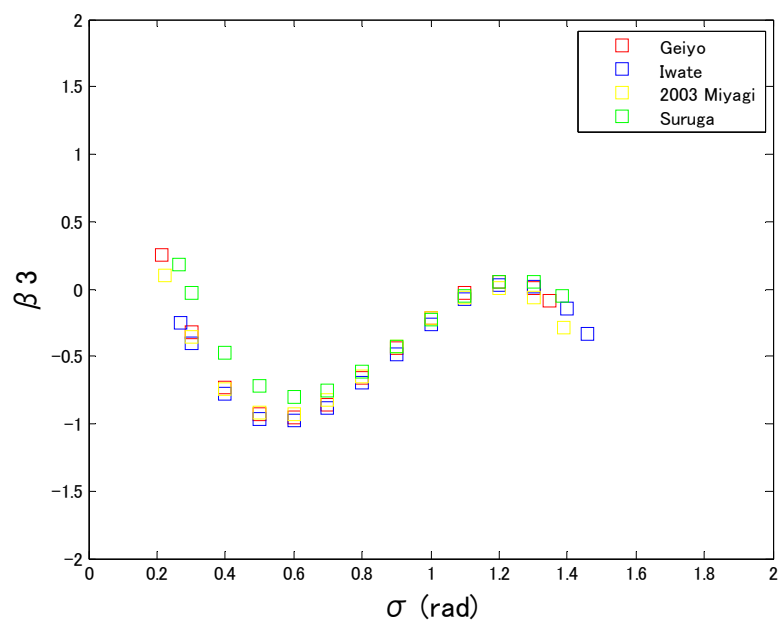


e) 5.0-10.0 Hz

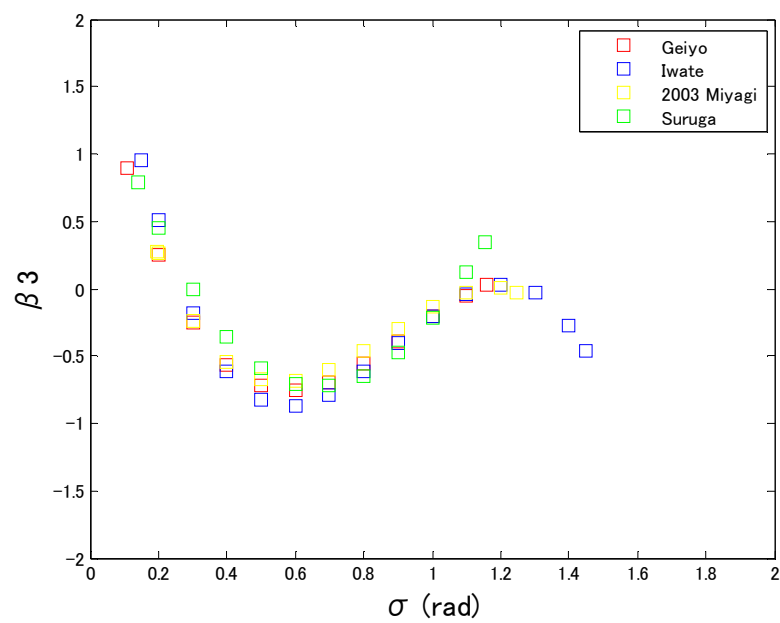


f) 0.1-10.0 Hz

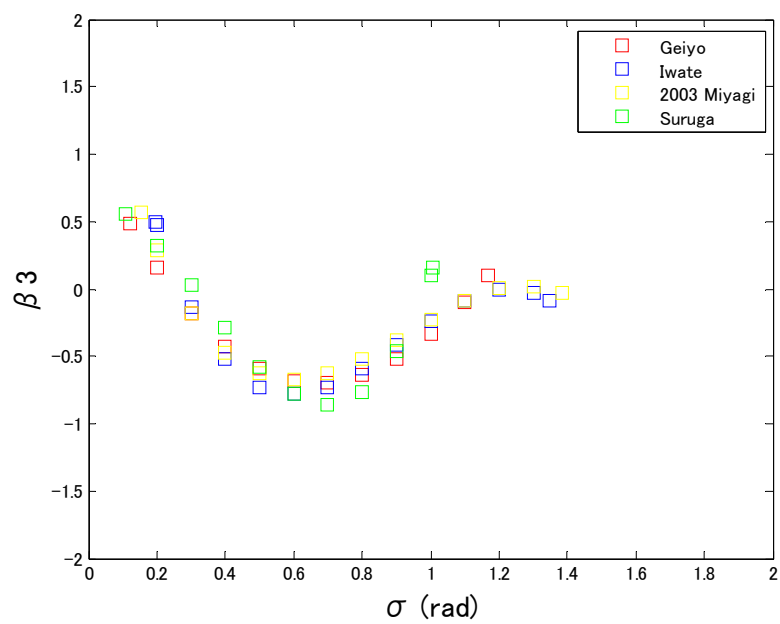
Fig.3.23: average relations of β_3 and β_4 in all of the interface earthquakes in each frequency band



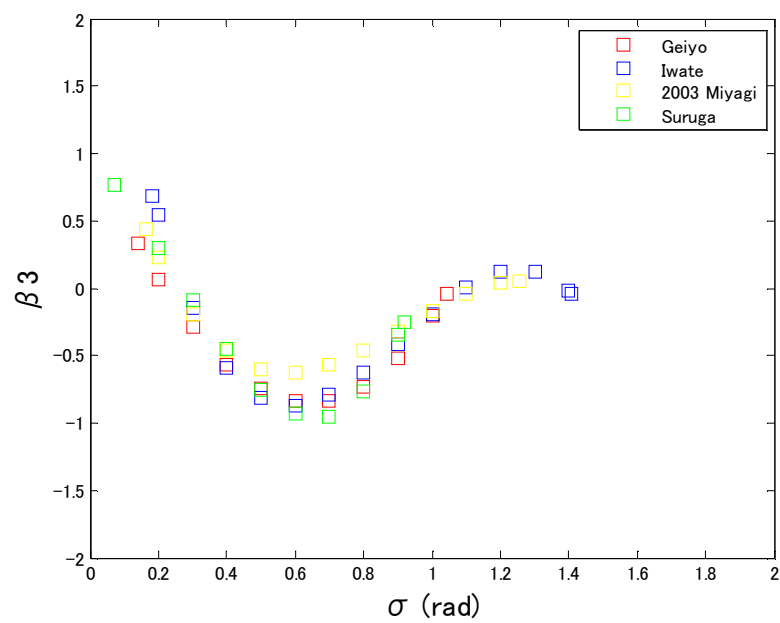
a) 0.1-1.0 Hz



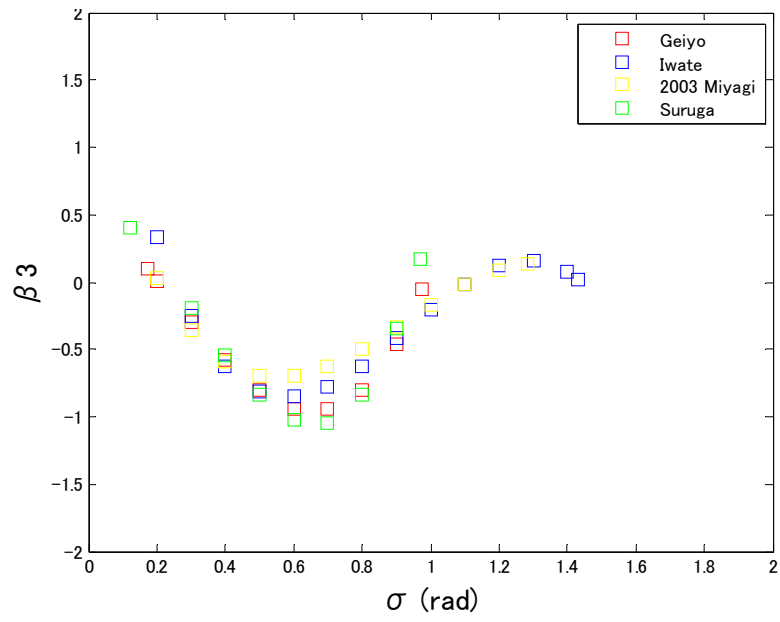
b) 1.0-2.0 Hz



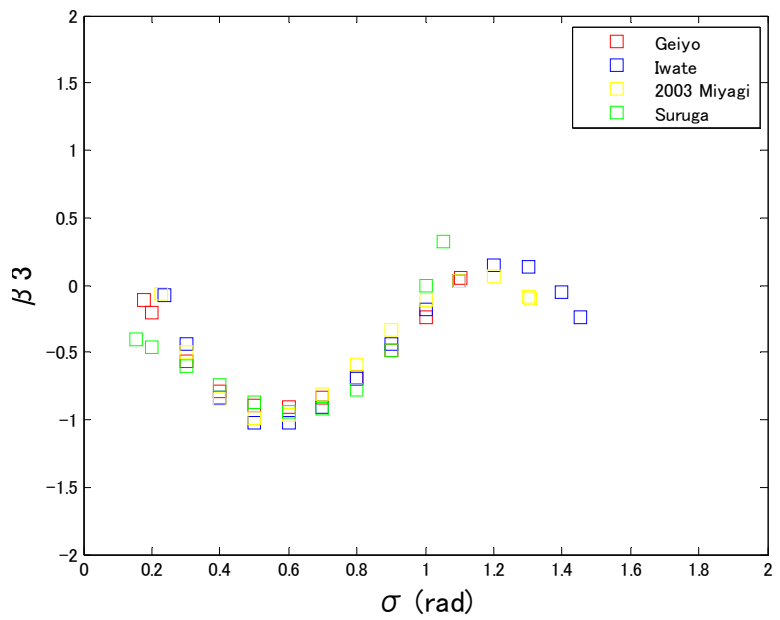
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

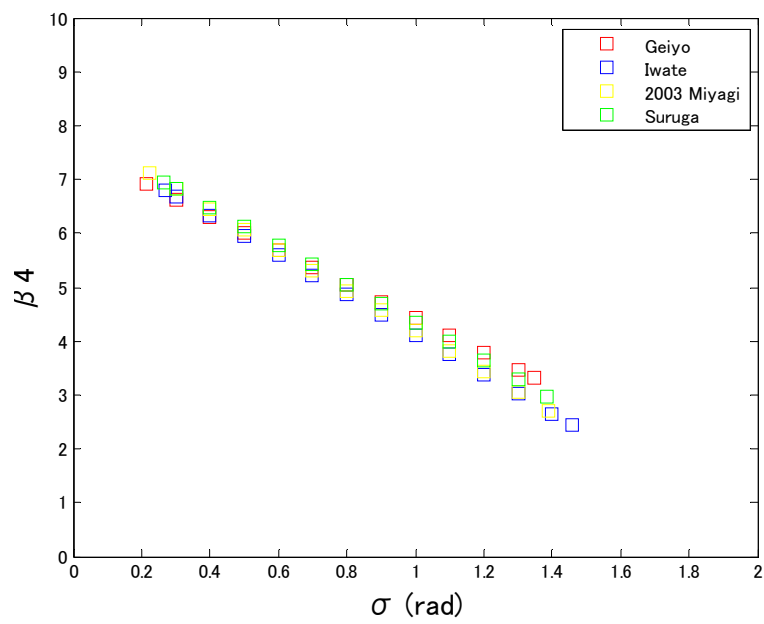


e) 5.0-10.0 Hz

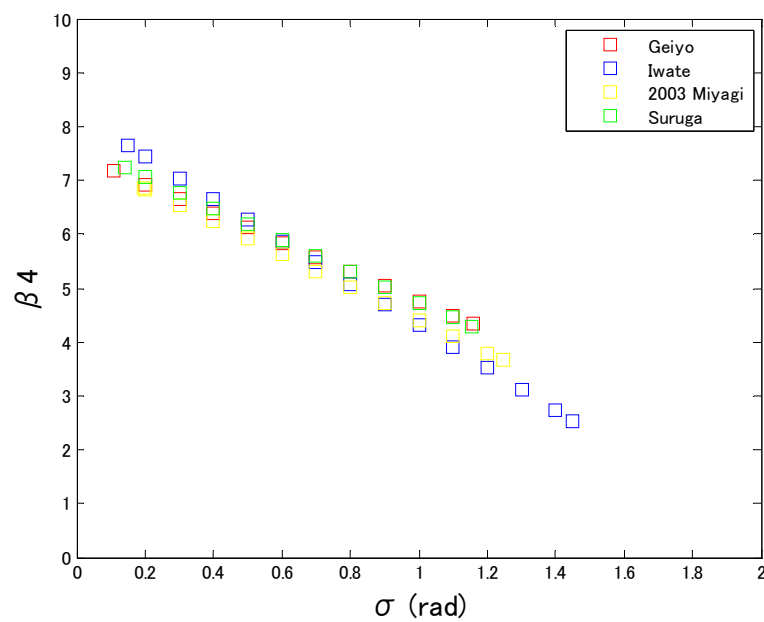


f) 0.1-10.0 Hz

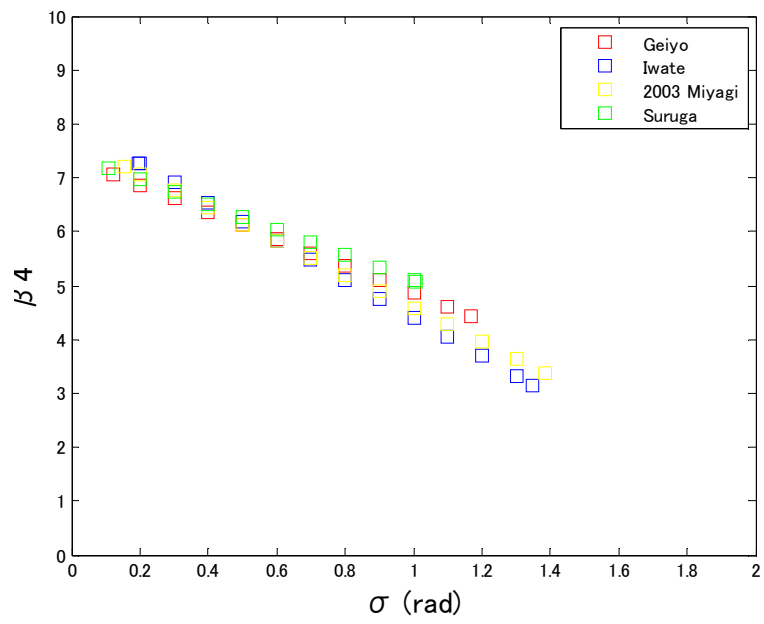
Fig.3.24: average relations of σ and β_3 in all of the intraplate earthquakes in each frequency band



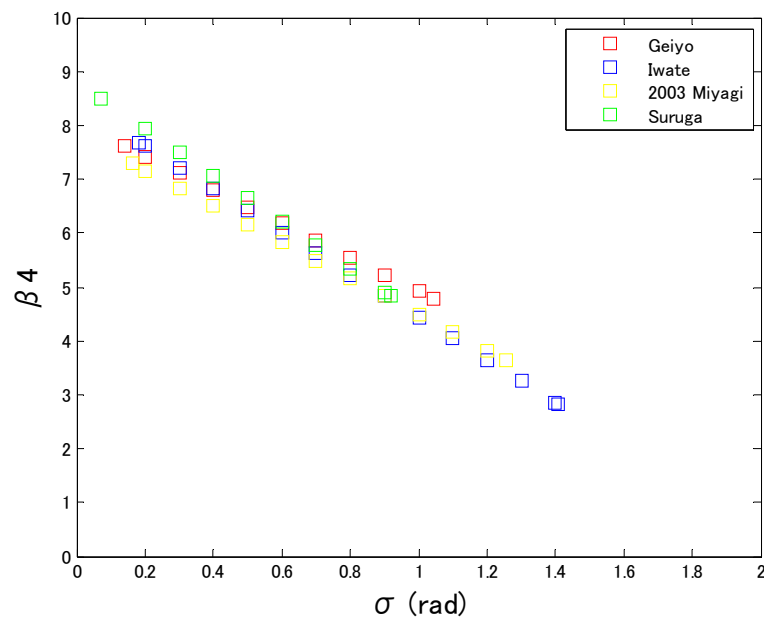
a) 0.1-1.0 Hz



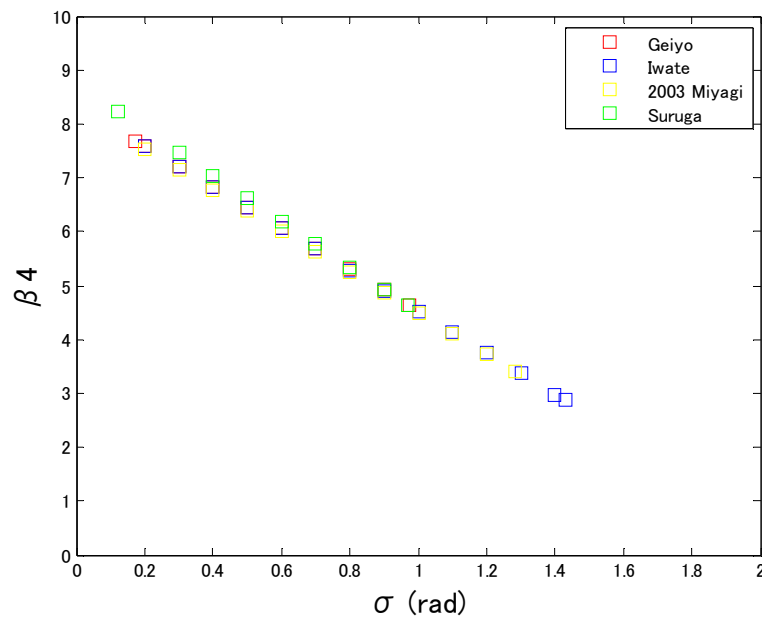
b) 1.0-2.0 Hz



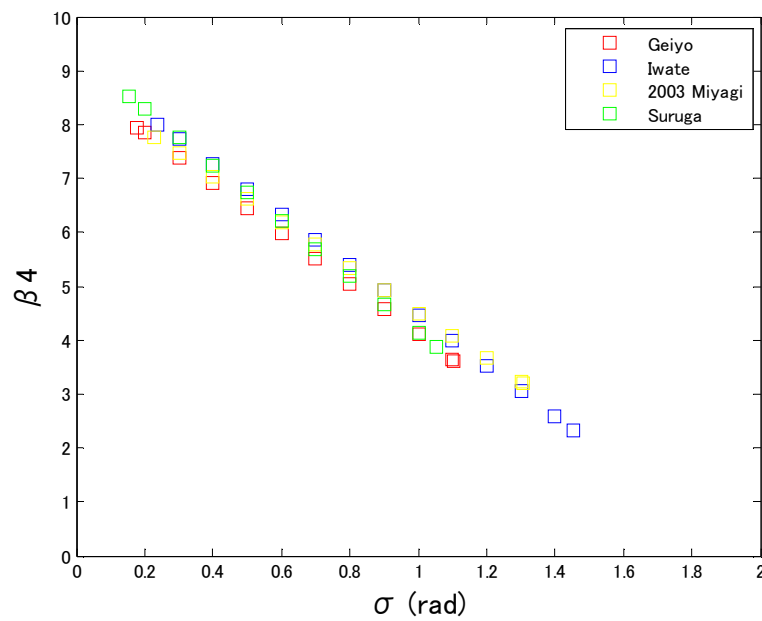
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

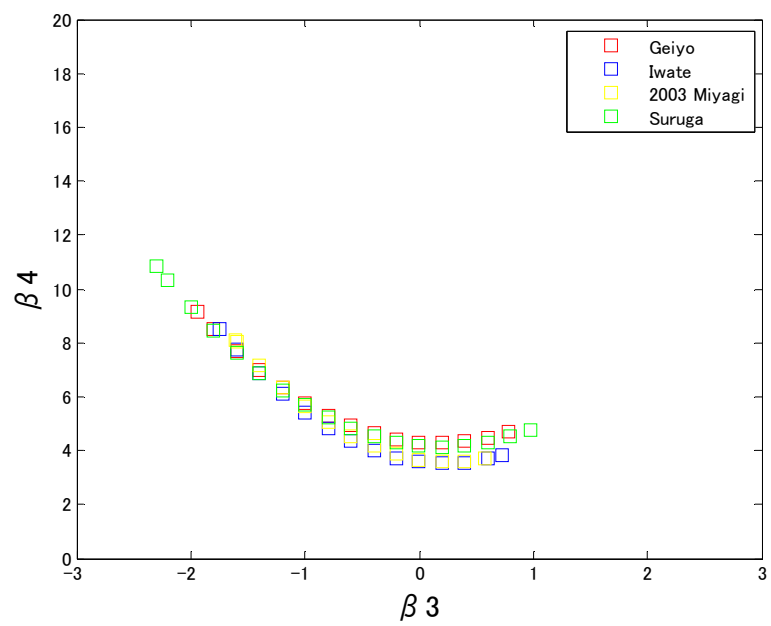


e) 5.0-10.0 Hz

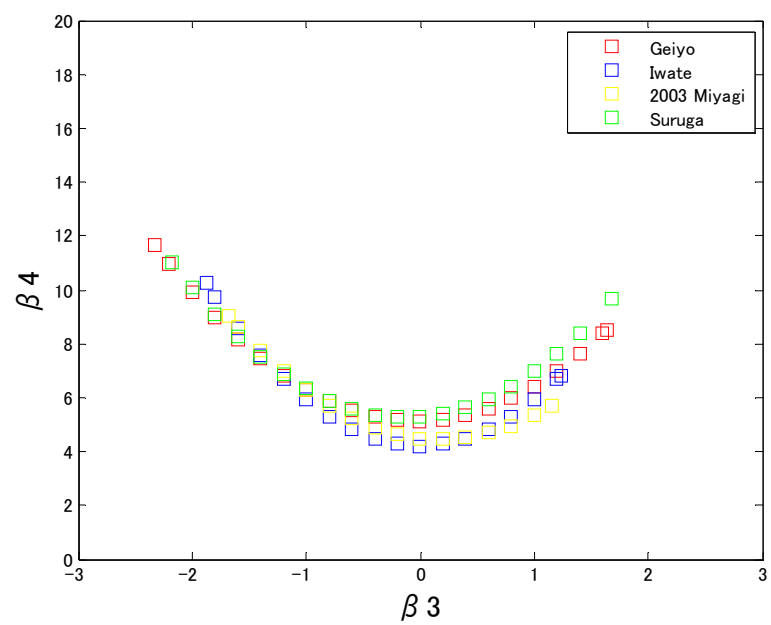


f) 0.1-10.0 Hz

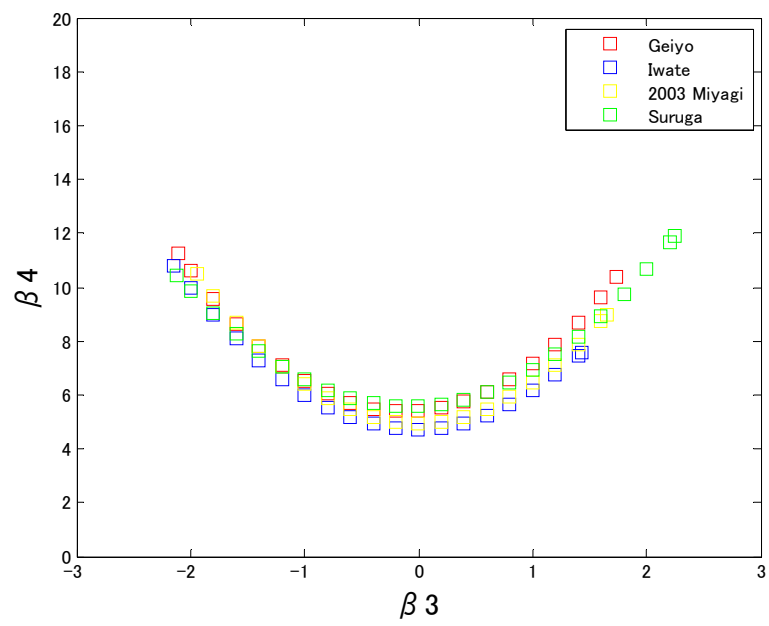
Fig.3.25: average relations of σ and β_4 in all of the intraplate earthquakes in each frequency band



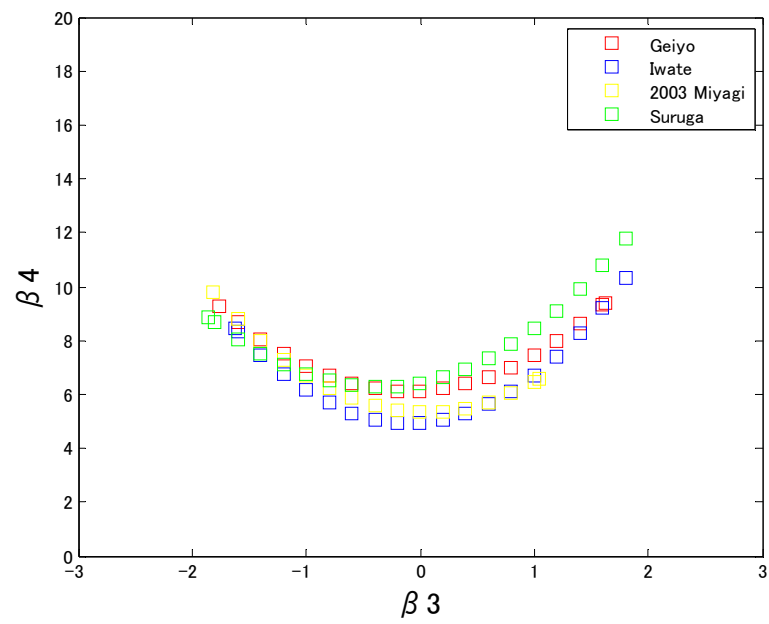
a) 0.1-1.0 Hz



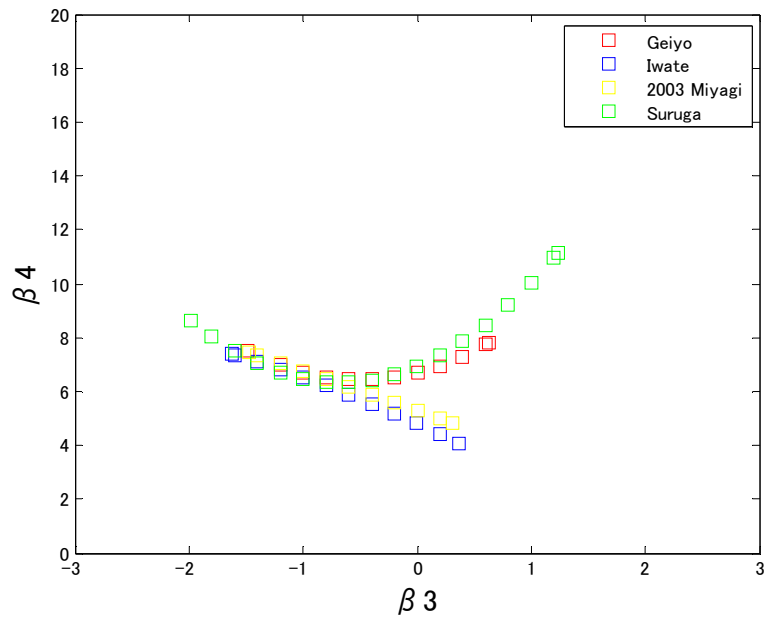
b) 1.0-2.0 Hz



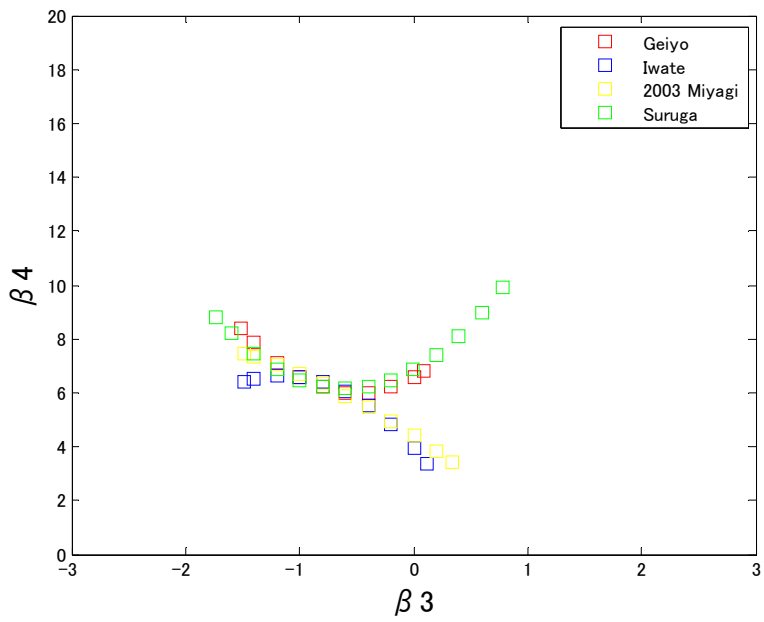
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz



e) 5.0-10.0 Hz



f) 0.1-10.0 Hz

Fig.3.26: average relations of β_3 and β_4 in all of the intraplate earthquakes in each frequency band

3.6 まとめ

本章では β_3 と β_4 の値に大きな影響を与える位相差分の外れ値に着目した。まず位相差分の外れ値を $\mu - 4\sigma$ より小さな位相差分と定義し、エネルギーに関する指標 R_E を用いて位相差分が外れ値となる周波数におけるフーリエ振幅の大きさを定量的に評価した。

その結果として $R_{E,k}$ と $R_{E,k+1}$ の値は平均して Table.3.1 に挙げられているような小さな値を取ることが分かった (Table.3.1 の一段目に各帯域内の位相差分データ数に対する外れ値の割合 R_{num} も示されている)。よって位相差分の外れ値は入力エネルギー全体に対して無視出来るような影響しか持たないと分かる。

最後に外れ値を抜いた時の σ と β_3 、 σ と β_4 、および β_3 と β_4 の関係を 2.2 節で扱った 5 つの帯域と 2.1 節で扱った 0.1 – 10.0 Hz についてそれぞれの地震毎にまとめた。その結果、地震のメカニズムや規模などの違いに起因すると思われる系統的な差は地震間では認められなかった。また σ が小さい場合に地震間の β_3 の値の差は大きい。一方 σ と β_4 の関係については地震間の差は比較的小さい。これらのことから、位相差分の統計量の関係は地震毎・周波数帯域毎に別個に定義されるべきであると考えられる。

第三章の参考文献

- 1) 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.
- 2) 川西智浩, 佐藤忠信: 観測記録を用いた位相スペクトルの内挿とそれに基づく地震動のシミュレーション, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp. 1727 – 1728, 2002.
- 3) 白井克弘, 大町達夫: 地震動のフーリエ振幅と位相の関連性について, 土木学会地震工学論文集 28 No.7, pp. 1 – 6, 2005.

4. 位相差分の σ の推定に関する検討

第三章までの結果から、地震動の位相差分の標準偏差 σ を適切に推定出来れば、 $\beta_3 \cdot \beta_4$ ともに（ある範囲をもって）推定することが可能であると分かる。本章では地震の震源と伝播特性に基にして、これまで考慮されなかった新たな σ の推定方法を提案する。

4.1 エネルギー減衰（*Energy Attenuation, E.A.*）を用いた σ の推定方法について

既に第一章で位相差分の σ が地震動の主要動の継続時間の目安であると述べた。既往の研究では σ または継続時間は震源からの距離で説明できるとされてきた。その例をいくつか挙げる。石井・渡辺（1987）¹⁾は70個の地震の観測波形から位相差分の σ を算出しマグニチュードや震源距離との関係性を調べた。その結果、 σ とマグニチュード、 σ と震源距離の間には共に正の相関があると述べた。さらに震源深さが浅い地震において大きい σ を得やすいとも指摘した。また山根・長橋（2002）²⁾は2000年鳥取県西部地震と2001年芸予地震の波形を用いて同様の検討を行った。そして震央距離が大きくなると、位相差分が分散していくことを指摘している。さらに山根・長橋（2005）³⁾は2003年十勝沖地震の観測点における波形について位相差分の σ と震源距離の散布図を描き、その2つに正の相関があることを指摘した。そして観測点を東西に分類し、各々について線形の回帰分析を行っている。ここで、観測点を東西に分けたのは、彼らが断層破壊過程におけるディレクティビティ効果と位相差分の σ を関係づけたためである。

一方、地震動の継続時間に関する研究例ではNovikova et al. (1993)⁴⁾がある。彼らはユーゴスラビアで観測された波形について周波数帯域毎の継続時間を算出し、マグニチュードや震央距離、地盤特性の違いに応じて整理した。その結果、中・高周波数帯域ではマグニチュードが大きいほど継続時間は長くなる、継続時間は震央距離が大きいほど長くなるが、その割合は周波数帯域によって異なる、低・中周波数帯域では堆積層を通過した波形の方が、より硬質の岩盤を通過した波形よりも継続時間が長い、などの結論を得ている。

上で指摘したようにこれらの研究例は位相差分の σ あるいは継続時間は震源からの距離が大きくなるに従って増大する、という結論に至っている。またいくつかの論文では実際に震源距離または震央距離を説明変数とした線形の回帰分析を行っている。しかし本論文で著者が扱ったデータについて、周波数帯域毎に σ を算出し、震源距離（以下 D ）との関係を見ると必ずしも明確な相関関係が見られないことがある。その例をFig.4.1に示す。Fig.4.1の上側は2003年十勝沖地震の波形の0.1–1.0 Hz、下側は2003年宮城県沖地震の波形の2.0–3.0 Hzにおけるデータを使用している。線形の回帰直線も重ねて示したが、回帰直線からのばらつきは大きい。

地震動は震源から不均質な速度構造あるいは減衰構造を伝播して観測点に至るため、 D だけで σ を説明するのは困難であることをこれらの例は示している。

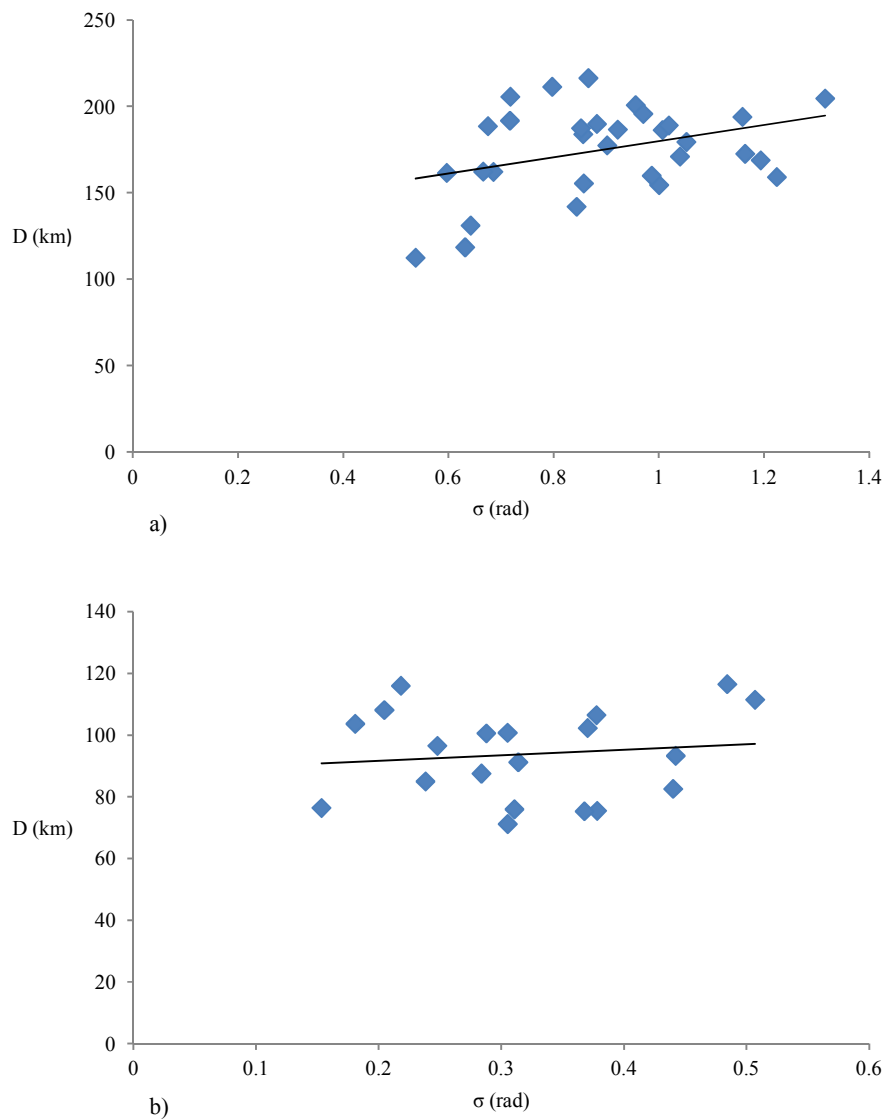


Fig.4.1: examples of $\sigma - D$ relation

このことを踏まえて著者は、算出された位相差分の σ を地震の震源から各サイトに達するまでに失われるエネルギー減衰量を用いて表すこととした。各サイトの観測波形の持つエネルギーは震源からそのサイトに至るまでに地震波が通ってきた深部地盤の不均質性の影響を含んでいるので、 σ との対応が、単に D のみを用いるより明確に見えると考えたのである。さらにもう一点この手法の利点として、位相差分情報を用いて波形をシミュレーションする際に、 σ と波形のエネルギーを同時に推定出来ることが挙げられよう。

このエネルギー減衰（以下, *Energy Attenuation, E.A.*）を求めるためには, まず地震の震源におけるエネルギーを定義する必要がある. 本論文では Boore (1983)⁵⁾ で与えられた加速度震源スペクトル (ω^2 モデル) を震源スペクトルとして採用した. その加速度震源スペクトルは次の式で与えられている.

$$F_{source}(f) = \frac{R_{\theta\phi} F_s P_{RTITIN}}{4\pi\rho\beta^3} M_0 \frac{\omega^2}{1+(\omega/\omega_c)^2} \left[1 + (\omega/\omega_m)^{2s}\right]^{-0.5} \quad (4.1)$$

ここに $F_{source}(f)$ は震源 Boore (1983)⁵⁾ の加速度震源スペクトル (cm/s), ω は角周波数 (rad/sec), $\rho \cdot \beta$ は震源における密度 (g/cm³) とせん断波速度 (km/s), $R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターン係数, F_s は自由地表面の振幅増幅効果を表す定数, P_{RTITIN} は水平 2 成分へのエネルギー分配を表す定数, M_0 は地震モーメント (dyne-cm), ω_c はコーナー周波数 (rad/sec) である. 本論文では佐藤 (2007)⁶⁾ にならい, $\rho \cdot \beta$ はプレート境界地震とスラブ内地震についてはそれぞれ 3.0 g/cm³, 4.0 km/s, 直下型地震については 2.7 g/cm³, 3.4 km/s とおき, $R_{\theta\phi}$ は 0.63, F_s は 2, P_{RTITIN} は 1 とした. また, ω_m はプレート境界地震とスラブ内地震については $13.5 \cdot 2\pi$ rad/sec, 直下型地震については $6.0 \cdot 2\pi$ rad/sec とした. s については Boore (1983)⁵⁾ にならい 4 とした.

ω_c については Boore (1983)⁵⁾ の式によって次のように算出した.

$$\omega_c = 2\pi \cdot 4.9 \cdot 10^6 \cdot \beta (\Delta\sigma/M_0)^{1/3} \quad (4.2)$$

ここに $\Delta\sigma$ は応力降下量 (bar) である. 本検討では $\Delta\sigma$ の値は, 2007 年以前に発生した地震については中村 (2009)⁷⁾ を参照した. 2009 年駿河湾の地震については文献 8) から $\Delta\sigma = 586$ bars とした. そして 2011 年三陸沖地震については文献 9) の図 4.3 により断層面積を 1513 km² と推定し, 断層面の縦横比を 2 と仮定することによって $\Delta\sigma = 30$ bars と推定した.

地震モーメント M_0 は Boore (1983)⁵⁾ から引用した次の式から推定した.

$$M_0 = 10^{1.5(M_w+10.7)} \quad (4.3)$$

ここで M_w は地震のモーメントマグニチュードである.

続いて各サイトにおけるフーリエスペクトル ($F_{site}(f)$) を定義する. 本論文では KiK-net の地中サイトにおける波形を検討の対象としてきた. これらの地中観測点がもし $V_s > 2000$ m/s の硬質な岩盤上に位置していたならば KiK-net の地中観測波形をそのまま $F_{site}(f)$ とした. それ以外のケースではまず, J-SHIS¹⁰⁾ の深部地盤情報を基に KiK-net の観測点から $V_s > 2000$ m/s となる地層までの速度構造と単位体積重量を調べる. 次に $V_s > 2000$ m/s の層から KiK-net の観測点までの伝達関数を, 一次元重複反射理論を用いて計算する. 最後に KiK-net の地中観測波形のフーリエスペクトルをその伝達関数で除して, $F_{site}(f)$ とした. (なお伝達関数を計算する際に用いた Matlab のプログラムを Appendix.A の A.5 に掲載した. また地盤情報を推定したサイトについては, その地盤情報を KiK-net のコード順に Appendix.B に掲載している)

ある周波数帯域における $E.A.$ は式 (4.4) によって定義した.

$$E.A. = \frac{\text{ある周波数帯域における } F_{\text{site}}^2 \text{ の平均}}{\text{ある周波数帯域における } F_{\text{source}}^2 \text{ の平均}} \quad (4.4)$$

さて, 以上の手順で震源から各サイトに至るまでの $E.A.$ を求めることが出来る. ここで $E.A.$ は震源から地震波が伝播する経路によって大きな影響を受ける. 具体的には, 震源から減衰しにくい岩盤を通して観測点に到達すれば $E.A.$ は大きな値になり, 逆に減衰しやすい岩盤を伝わっていけば $E.A.$ は小さな値になる. Boore (1983)⁵⁾ では伝播特性によるフーリエスペクトルの減衰は式 (4.5) によって与えられており, 岩盤の減衰の大きさは式 (4.5) 中の Q (Q 値, Quality factor) で定量化されている.

$$\frac{1}{D} \exp\left(-\frac{\pi * f * D}{Q V_s}\right) \quad (4.5)$$

ここで, Q は媒質の Q 値, f は周波数 (Hz) である. 式中の $1/D$ の部分は幾何減衰項, \exp の部分は粘性減衰項である.

本論文では震源からサイトに至るまでの平均的な Q 値の大きさに応じてサイトをグルーピングして, グループ毎の σ と $E.A.$ との関係を見ていく.

その方法だが, まず式 (4.5) 中の f を特定の周波数ではなく周波数帯域と見れば次式のように考えることが出来る.

$$\sqrt{E.A.} = \frac{1}{D} \exp\left(\frac{-\pi * f * D}{\bar{Q} * \bar{V}_s}\right) = \frac{1}{D} \exp\left(\frac{-\pi * f}{\bar{Q}}\right)^{\frac{D}{\bar{V}_s}} \quad (4.6)$$

ここで, \bar{Q} は震源からサイトまでの平均的な Q 値, \bar{V}_s は震源からサイトまでの平均的なせん断波速度である.

\bar{V}_s は式 (4.7) のように表した.

$$\frac{\text{震源距離}}{(\text{せん断波の立ち上がり時刻}) - (\text{断層破壊開始時刻})} \quad (4.7)$$

せん断波の立ち上がり時間は波形から目視によって推定し, 断層破壊開始時間は 2007 年以前の地震については中村 (2009)⁷⁾ を引用し, それ以外の地震については気象庁発表のデータを参照した. このようにして \bar{V}_s を求めた後, 式 (4.6) を基に $\frac{-\pi * f}{\bar{Q}}$ の値を算出した. そして $\frac{-\pi * f}{\bar{Q}}$ の値から次のような分類をした.

Group 1: if $\frac{-\pi * f}{\bar{Q}} \leq -0.09960$

Group 2: if $-0.09960 < \frac{-\pi * f}{\bar{Q}} \leq -0.07472$

Group 3: if $-0.07472 < \frac{-\pi*f}{\bar{Q}} \leq -0.04982$

Group 4: if $-0.04982 < \frac{-\pi*f}{\bar{Q}} \leq -0.02491$

Group 5: if $-0.02491 < \frac{-\pi*f}{\bar{Q}} \leq 0$

Group 6: if $0 < \frac{-\pi*f}{\bar{Q}}$

$\bar{V}s = 3.6 \text{ km/s}$, $D = 100 \text{ km}$ を代入し, 式 (4.6) 中の $\frac{-\pi*f}{\bar{Q}}$ に $-0.02491, -0.04982, -0.07472, \dots$, を当てはめると $\sqrt{E \cdot A}$ の値は $0.005, (0.005)*0.5, (0.005)*0.25, \dots$ と等比数列として小さくなる. すなわち同じ D に対して最も $E \cdot A$ が高いのは Group 6 に含まれるデータ, 最も $E \cdot A$ が低いのは Group 1 に含まれるデータ, ということになる. なお, 様々なパラメータを定義した時の Boore が提案したスペクトルを求めるプログラムおよび $E \cdot A$ を求めるプログラムを, それぞれ Appendix.A の A.4 と A.6 に掲載した.

4.2 解析の概要

前節で各サイトにおける波形の位相差分の標準偏差 σ を, 地震の震源からの $E \cdot A$ で表現する方法について説明した. 本節では具体的に検討したサイトや周波数帯域について述べる.

まず解析の対象としたサイトの選定であるが, 原則として震央距離 100 km 程度以内の観測点を選んだ. これは防災や耐震工学のための強震動評価では断層近傍が重要であるという佐藤 (2007) ⁶⁾ の記述を基にしている. ただし海洋で発生した 2003 年十勝沖地震, 2005 年宮城県沖地震, そして 2011 年三陸沖地震については震央距離 100 km 程度以内のサイトが少ない, あるいは皆無である. そのため 2005 年宮城県沖については震央距離 150 km 程度以内, 2003 年十勝沖地震と 2011 年三陸沖地震については震央距離 200 km 程度以内のサイトを検討することにした. またサイトによっては KiK-net と J-SHIS の提供している地盤情報が大きく異なる場合もある. 具体的には, 例えば J-SHIS では地下 50 m 以内にせん断波速度が 2000 m/s を超える岩盤があるとしているのに対して, KiK-net のボーリング調査の情報では地下 100 m の点でせん断波速度がまだ 1000 m/s 程度の層である, といった場合である. このようなサイトは検討していない.

各地震で計算の対象とした観測点名や KiK-net 観測点コード, 経度・緯度情報, そして震源距離を Appendix.C に示す.

最後に $E \cdot A$ の算出に用いた周波数帯域についてだが, 2.2 節で定義した 5 つの帯域と, それらを全て含む $0.1 - 10.0 \text{ Hz}$ とした.

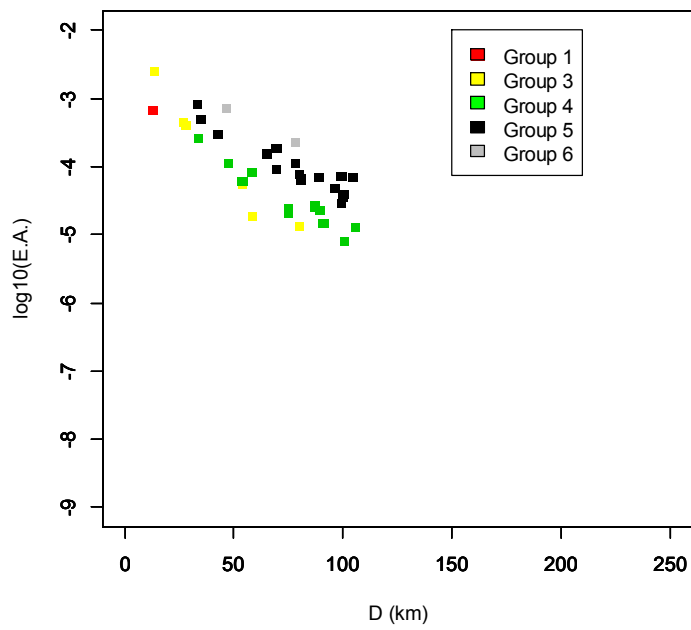
4.3 結果

計算の結果, 得られた震源距離 D とエネルギー減衰 $E.A.$, および位相差分の標準偏差 σ と $E.A.$ との関係を本節で示していく.

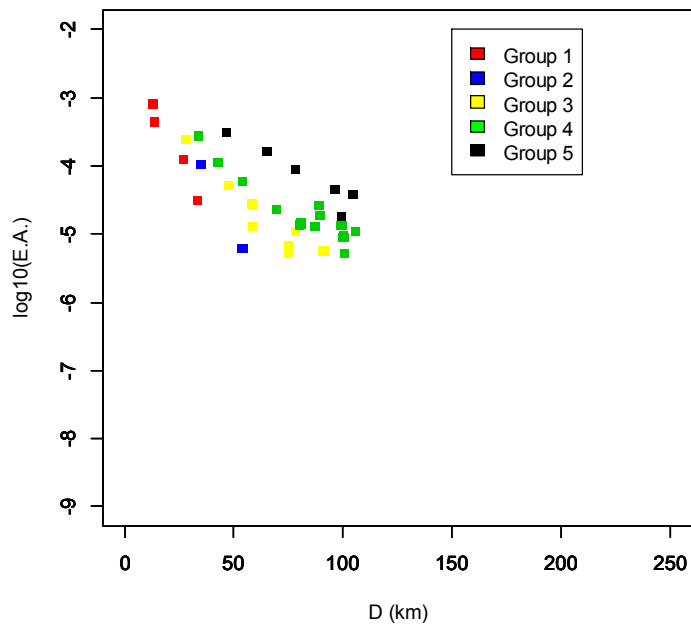
4.3.1 2000 年鳥取県西部地震における結果

2000 年鳥取県西部地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.2, Fig.4.3 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.4 に示す. Fig.4.2 と Fig.4.3 から次のような傾向を見て取れる.

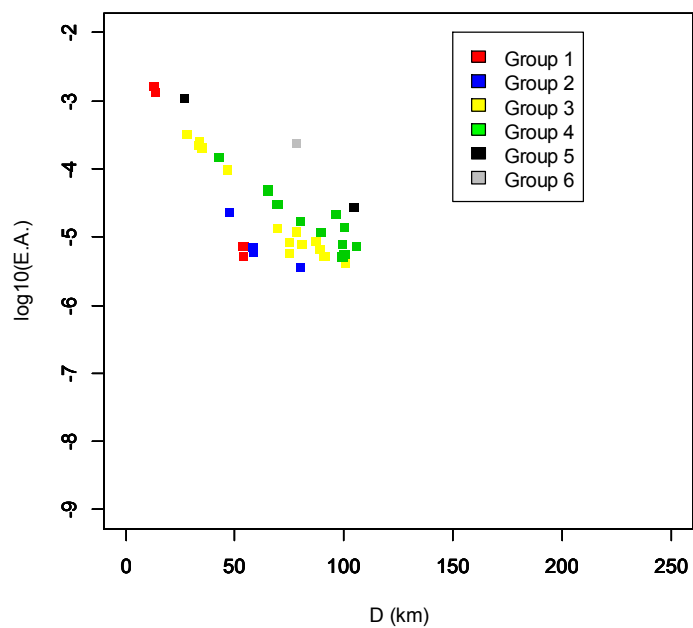
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) Group 間の σ と $E.A.$ の関係の差はそれほど大きくない
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



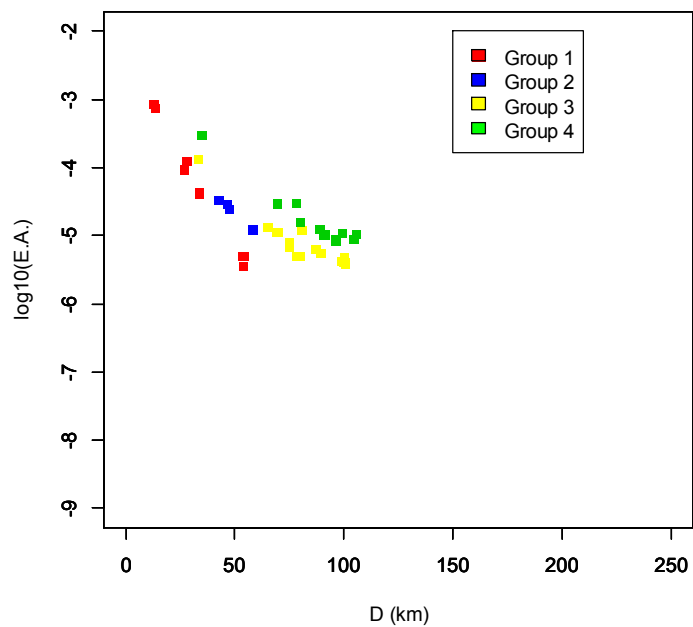
a) 0.1-1.0 Hz



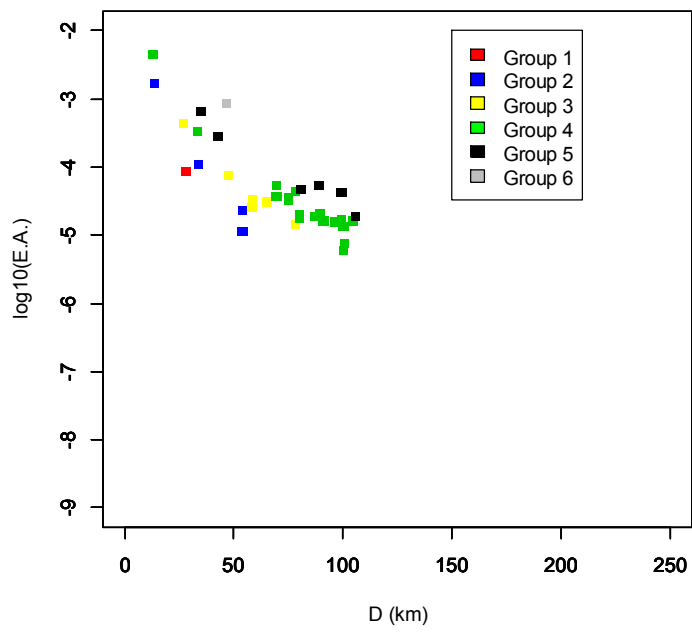
b) 1.0-2.0 Hz



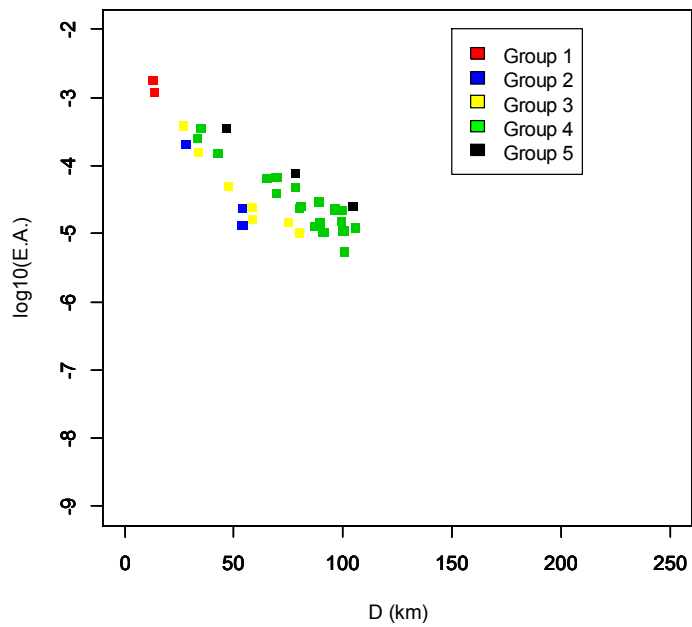
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

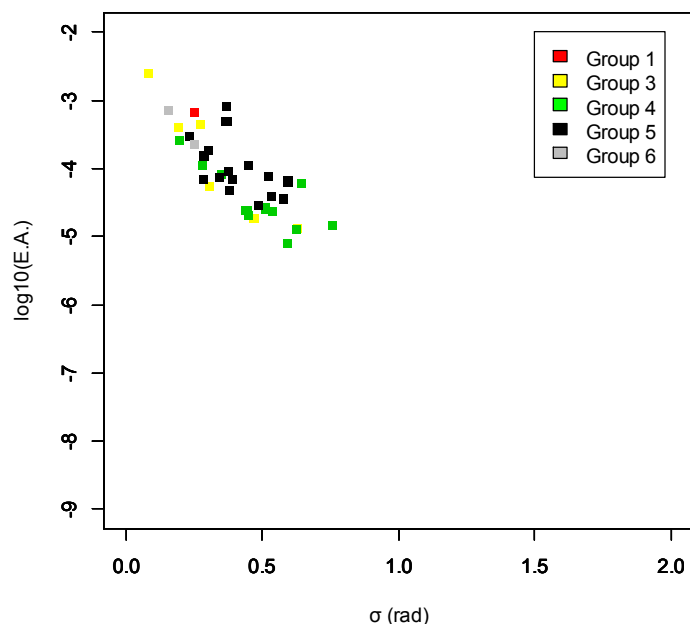


e) 5.0-10.0 Hz

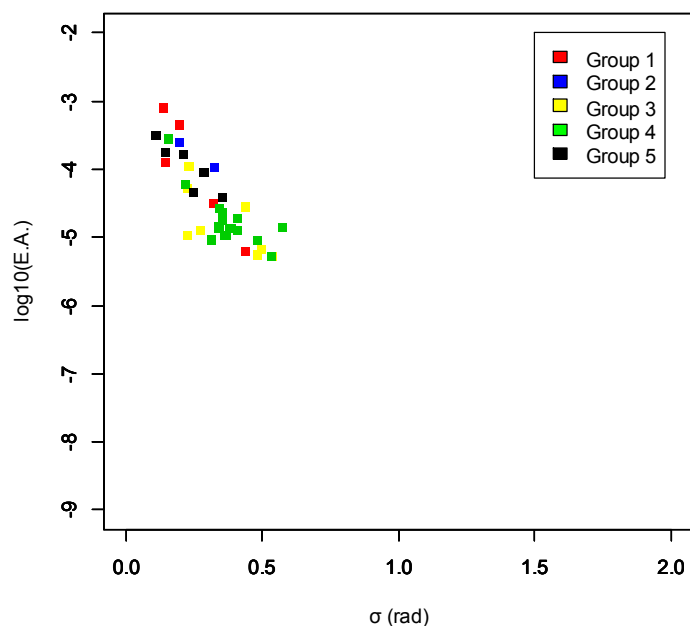


f) 0.1-10.0 Hz

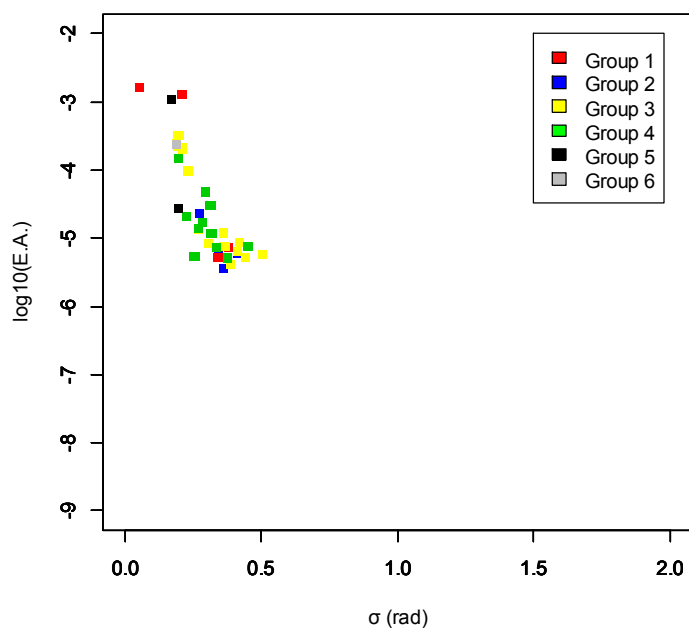
Fig 4.2: relations between D and $E.A.$ for 2000 Tottoriken seibu earthquake



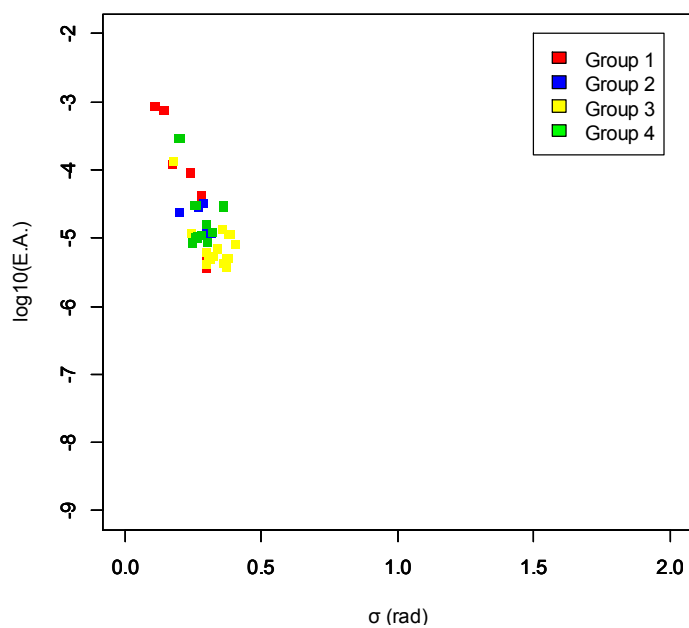
a) 0.1-1.0 Hz



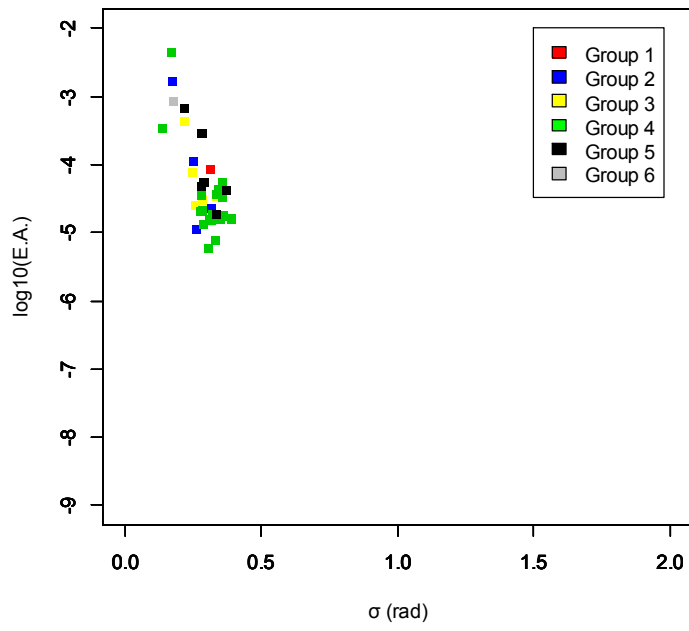
b) 1.0-2.0 Hz



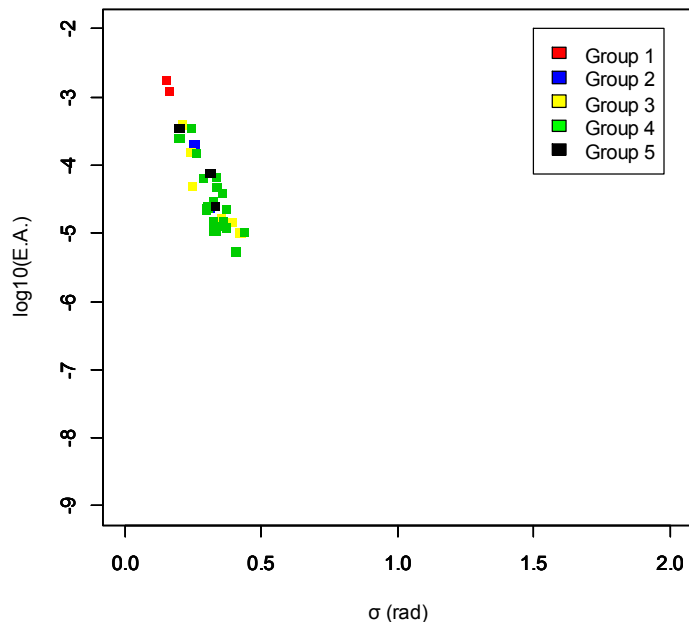
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

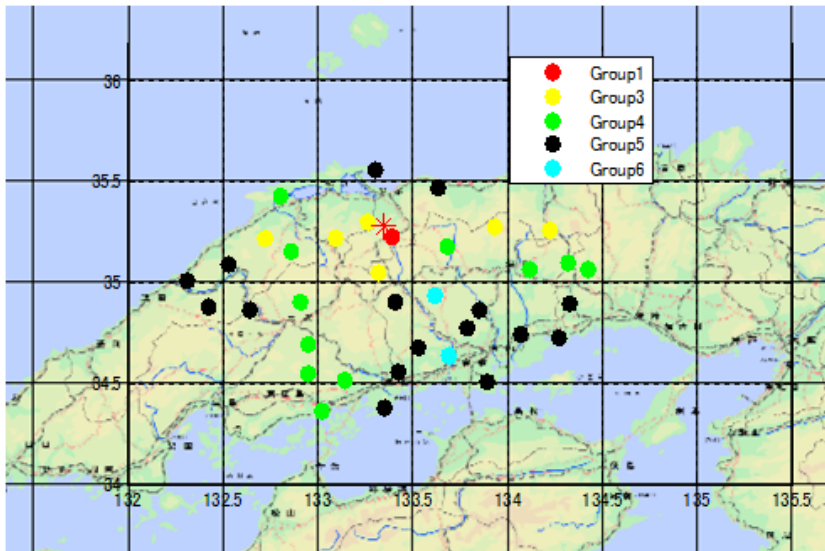


e) 5.0-10.0 Hz

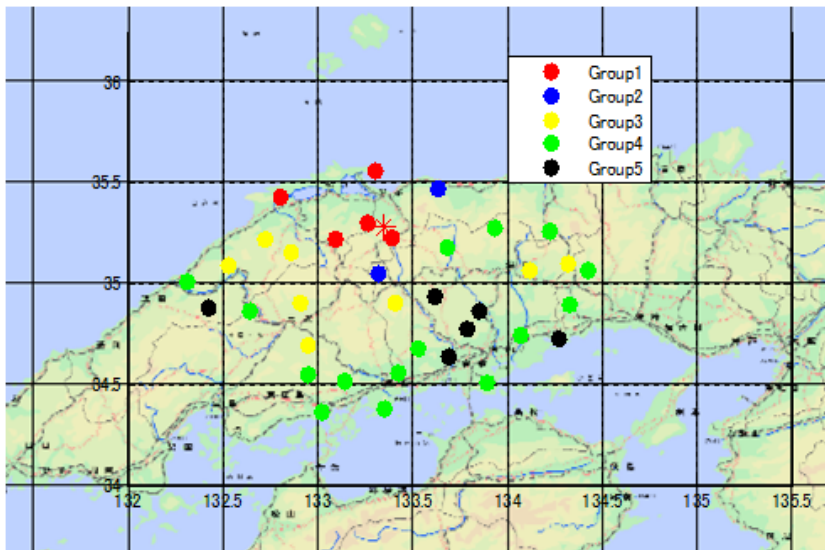


f) 0.1-10.0 Hz

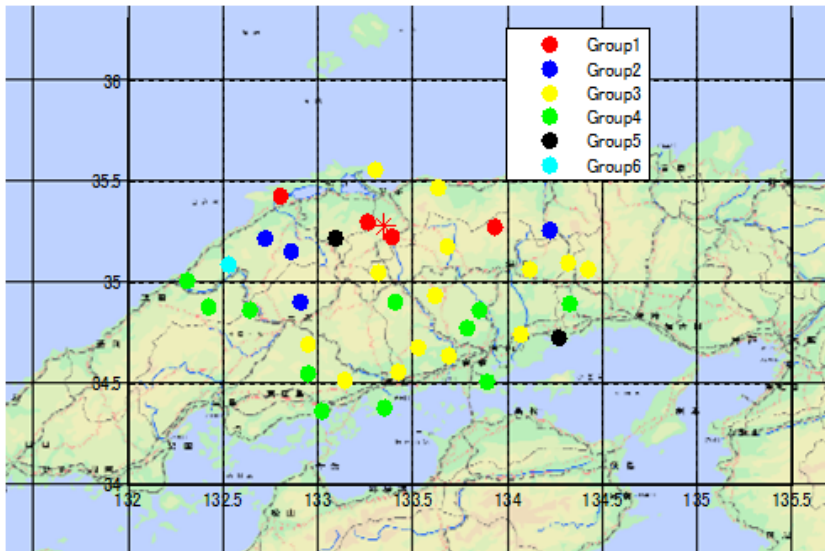
Fig.4.3: relations between σ and $E.A.$ for 2000 Tottoriken seibu earthquake



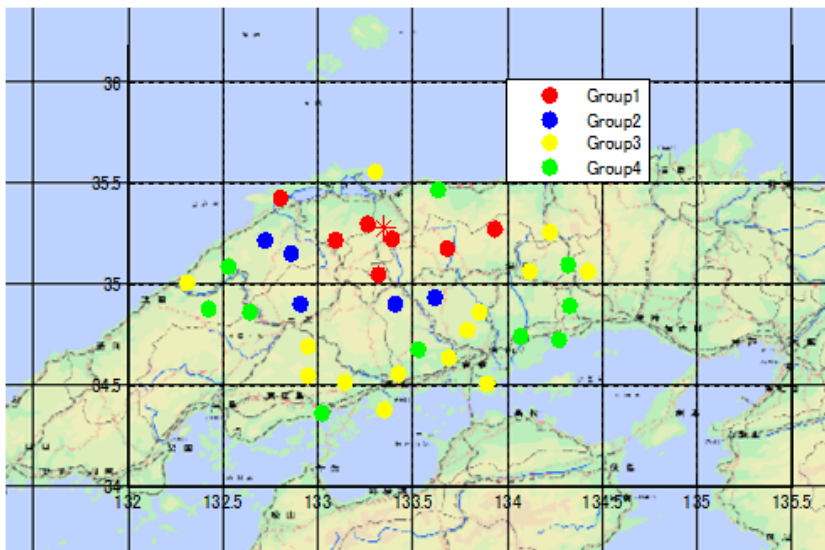
a) 0.1 – 1.0 Hz



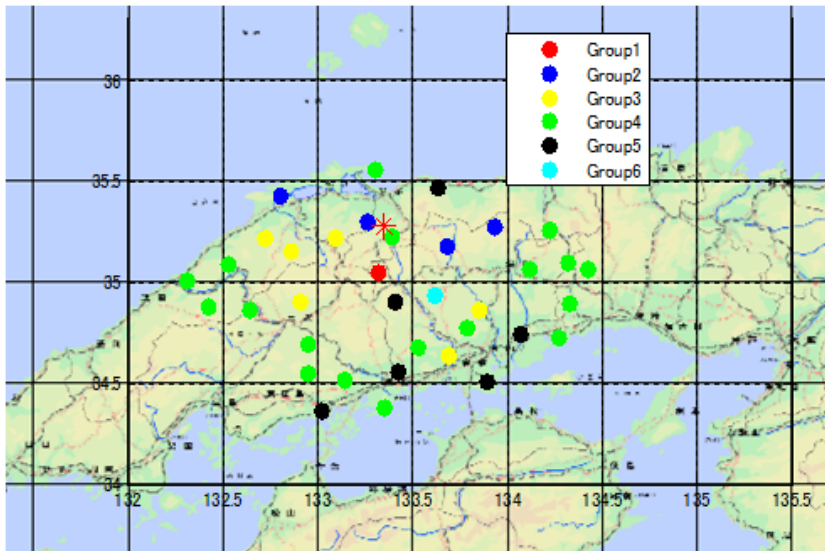
b) 1.0 – 2.0 Hz



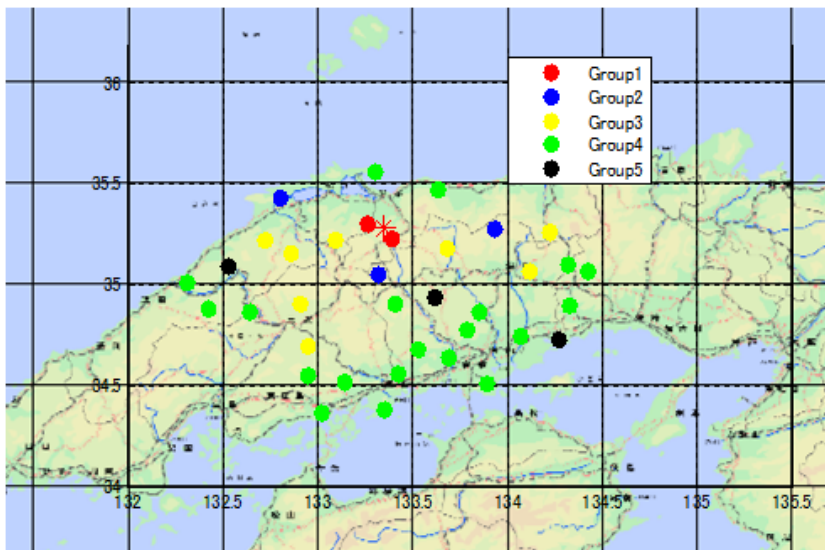
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



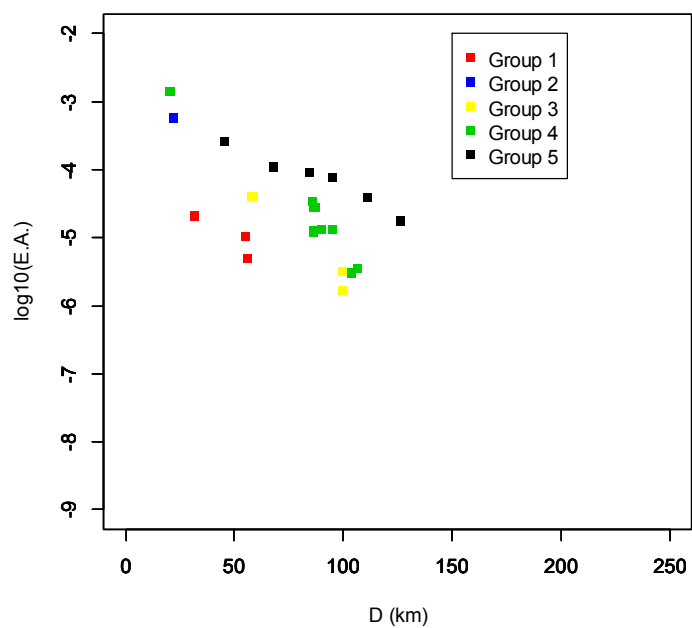
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.4: locations of sites in each Group for 2000 Tottoriken seibu earthquake

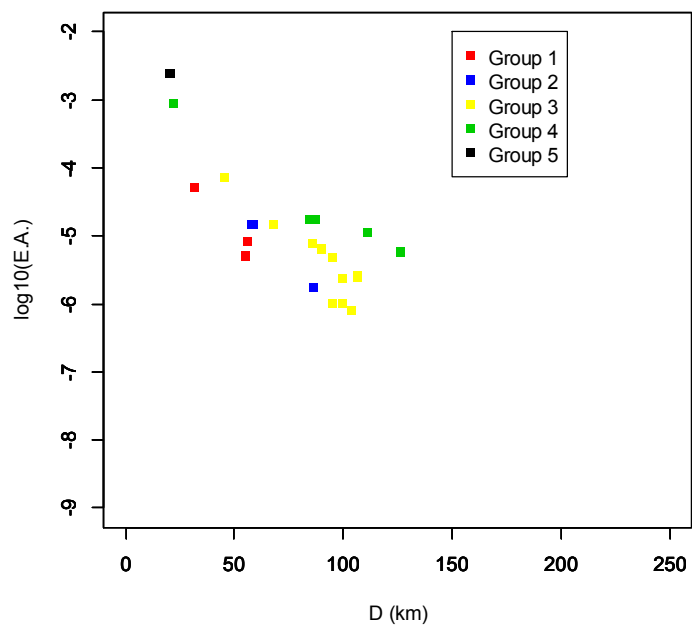
4.3.2 2004 年新潟県中越地震における結果

2004 年新潟県中越地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.5, Fig.4.6 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.7 に示す. Fig.4.5 と Fig.4.6 から次のような傾向を見て取れる.

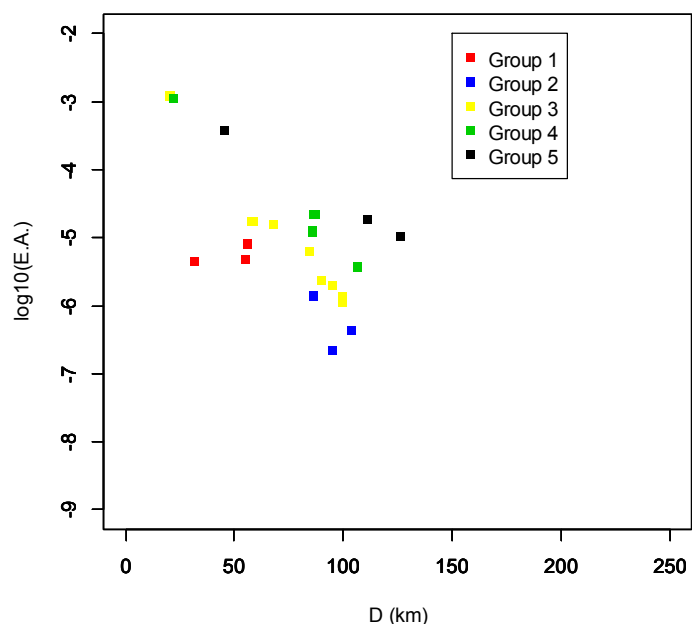
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz における Group 間の σ と $E.A.$ の関係の差は大きい. 一方, 高周波数帯域では Group 間の差は小さい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる.



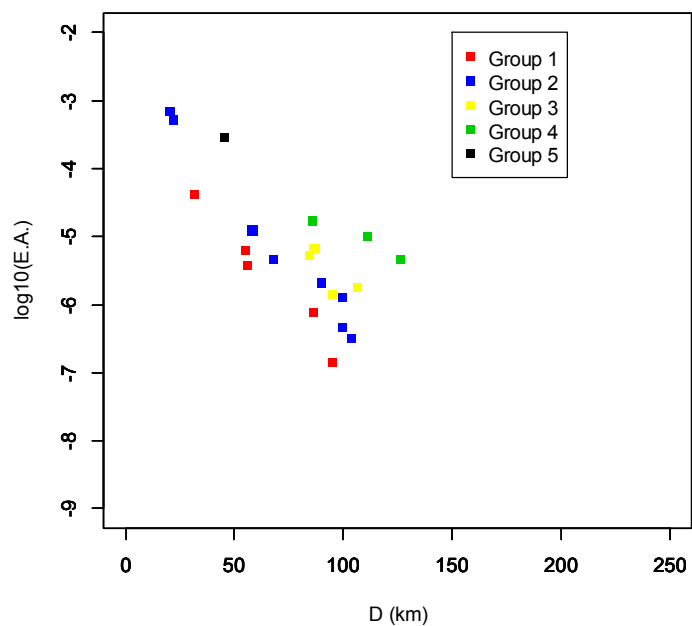
a) 0.1-1.0 Hz



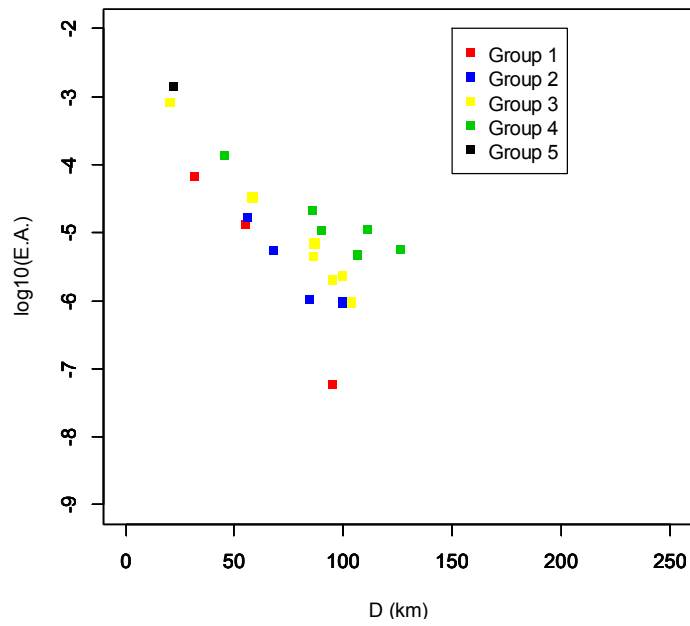
b) 1.0-2.0 Hz



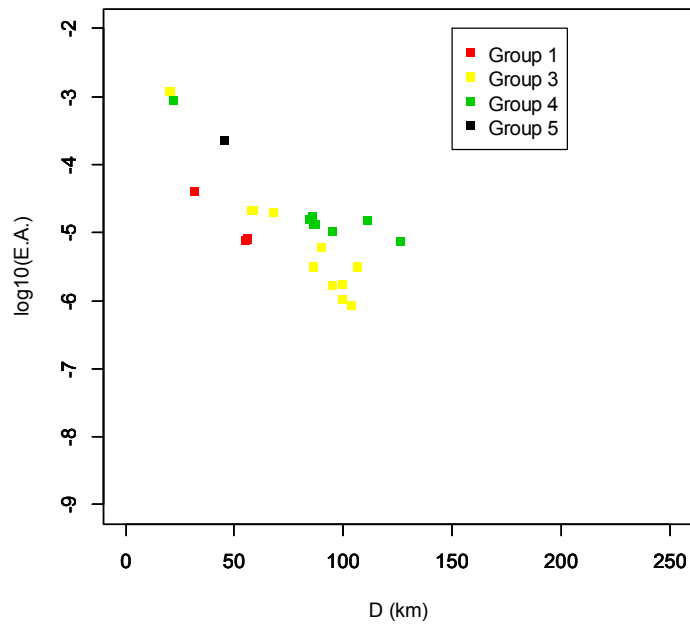
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

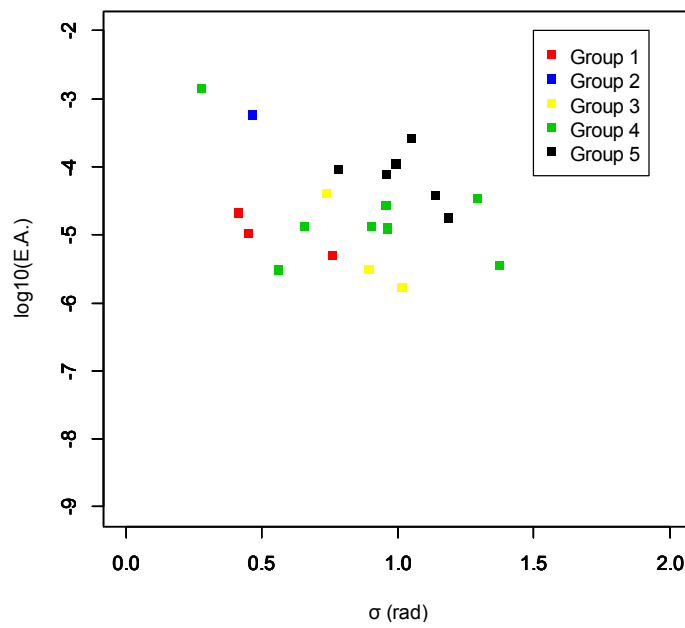


e) 5.0-10.0 Hz

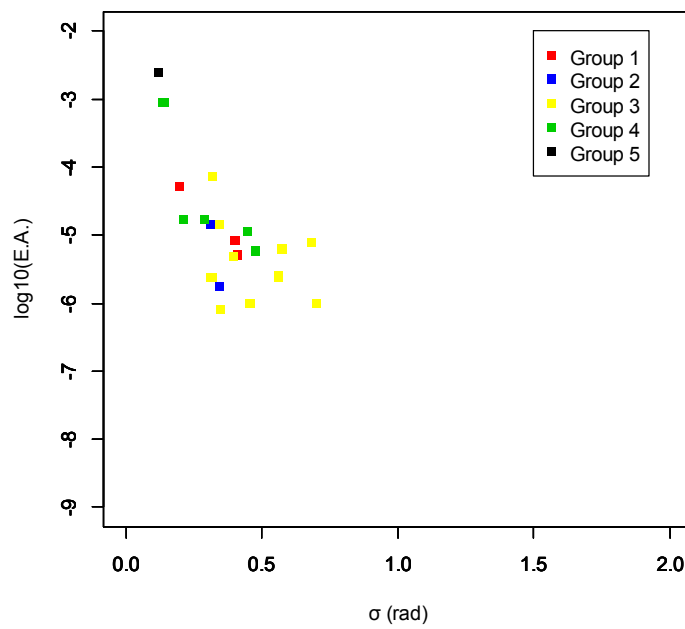


f) 0.1-10.0 Hz

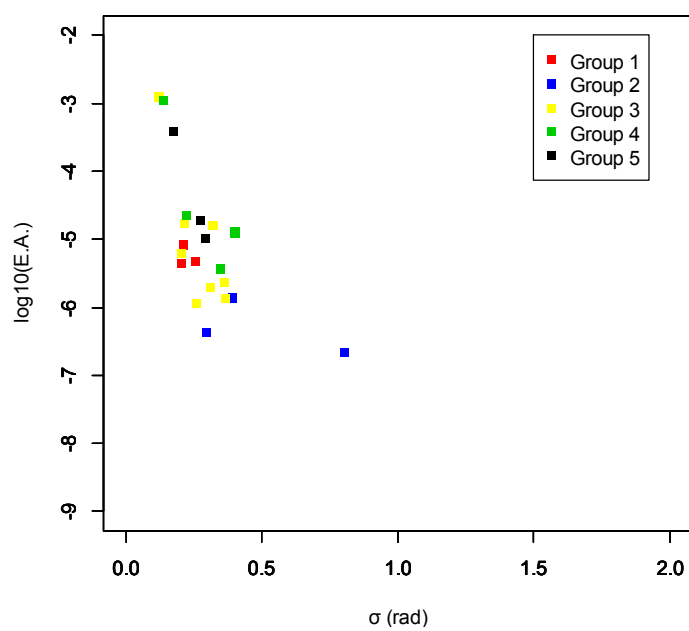
Fig.4.5: relations between D and $E.A.$ for 2004 Niigataken chuetsu earthquake



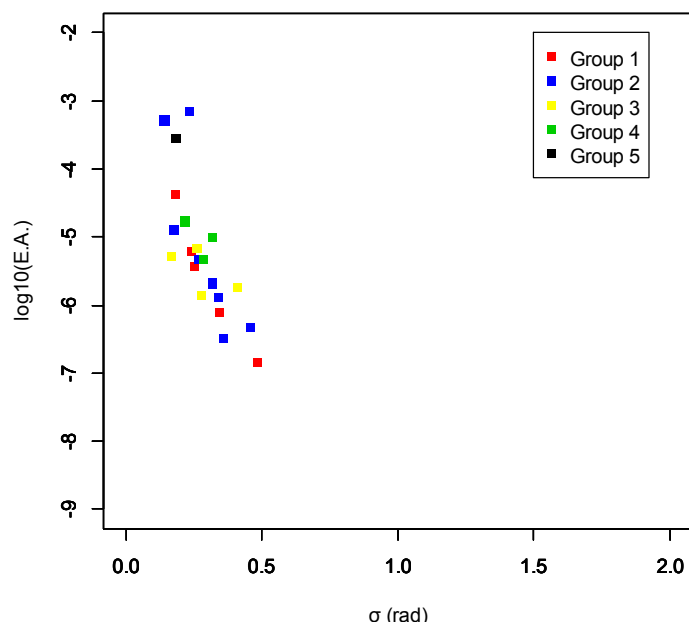
a) 0.1-1.0 Hz



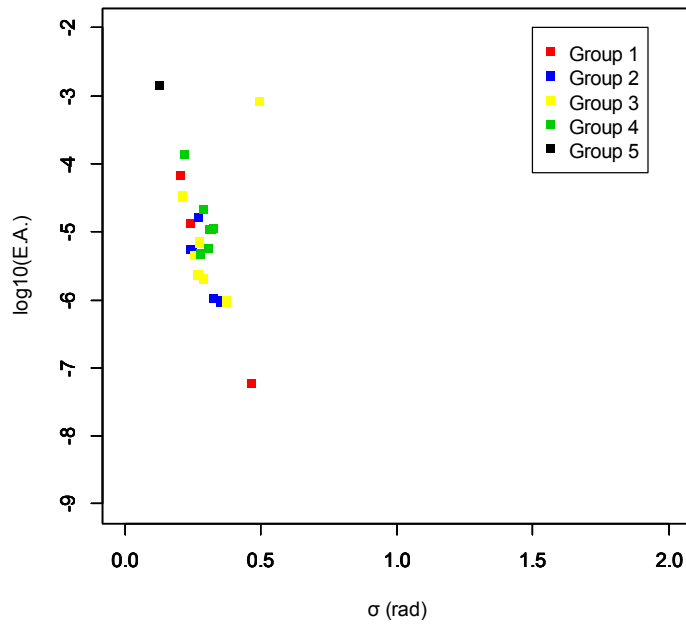
b) 1.0-2.0 Hz



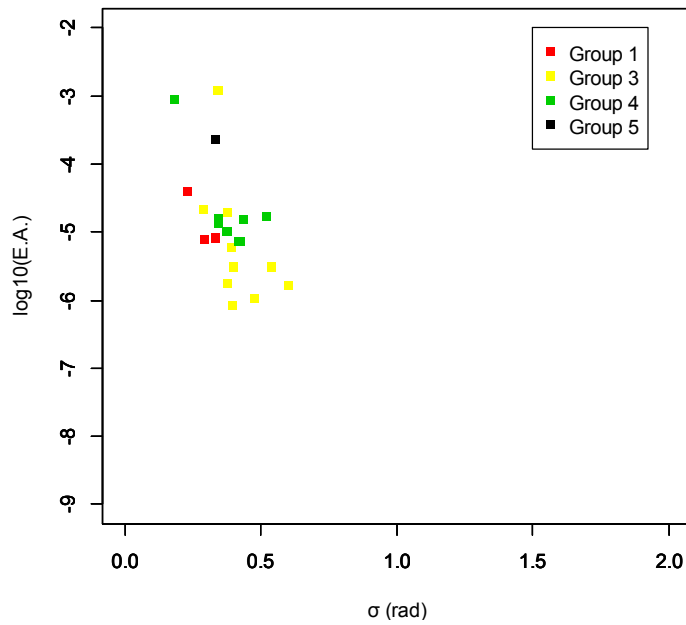
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

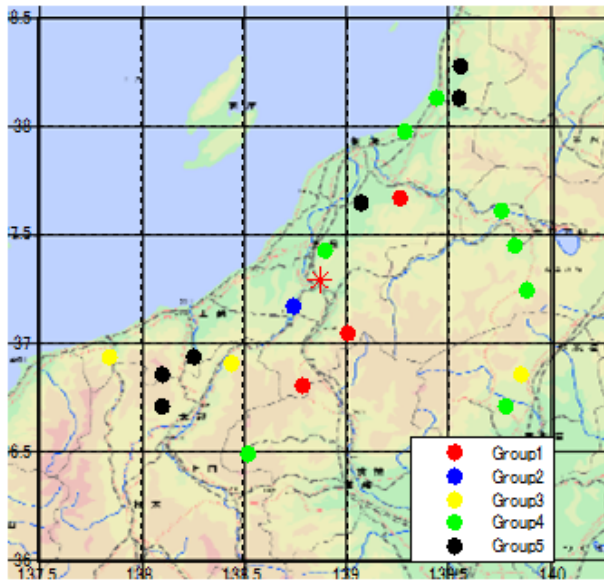


e) 5.0-10.0 Hz

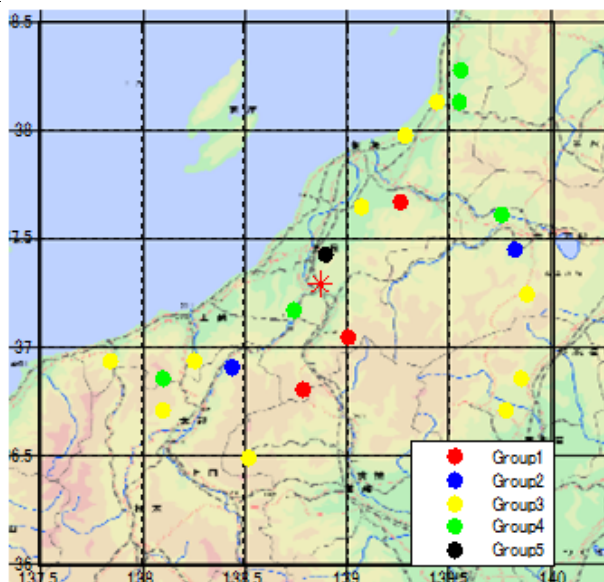


f) 0.1-10.0 Hz

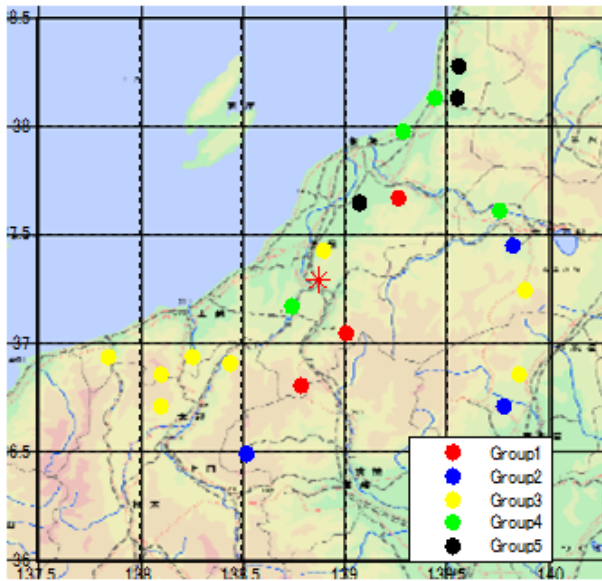
Fig.4.6: relations between σ and $E.A.$ for 2004 Niigataken chuetsu earthquake



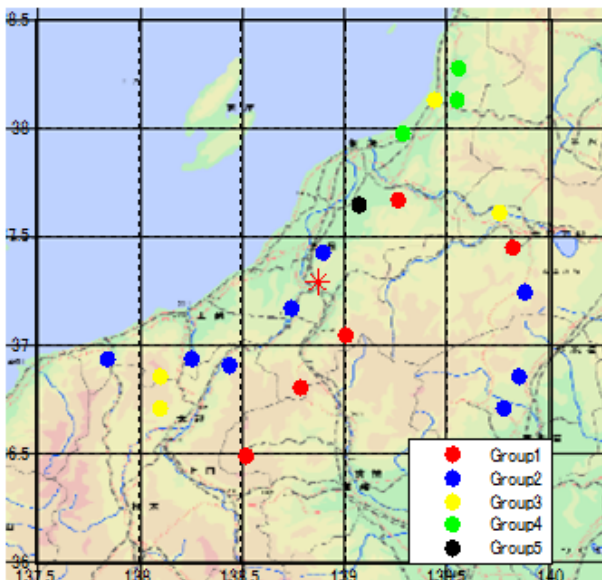
a) 0.1 – 1.0 Hz



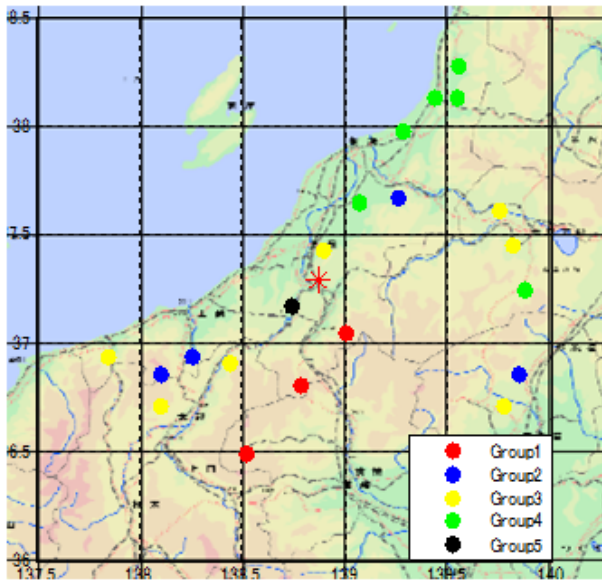
b) 1.0 – 2.0 Hz



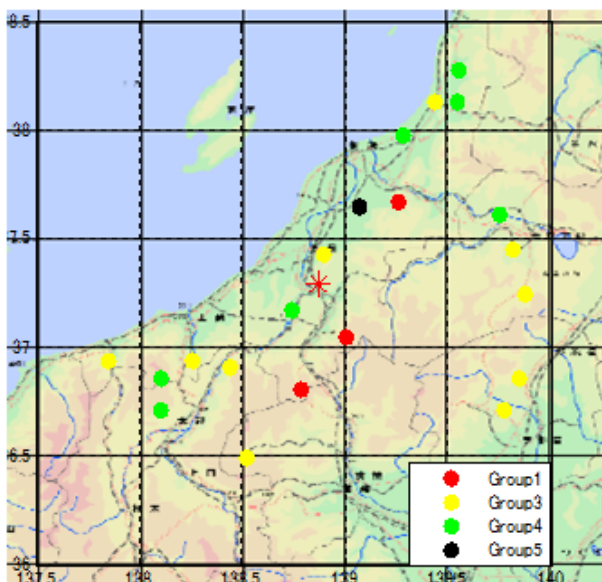
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



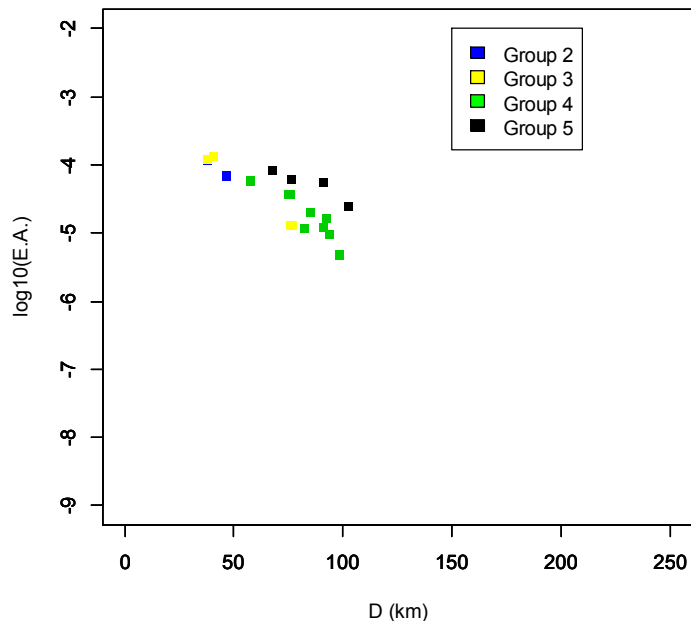
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.7: locations of sites in each Group for 2004 Niigataken Chuetsu earthquake

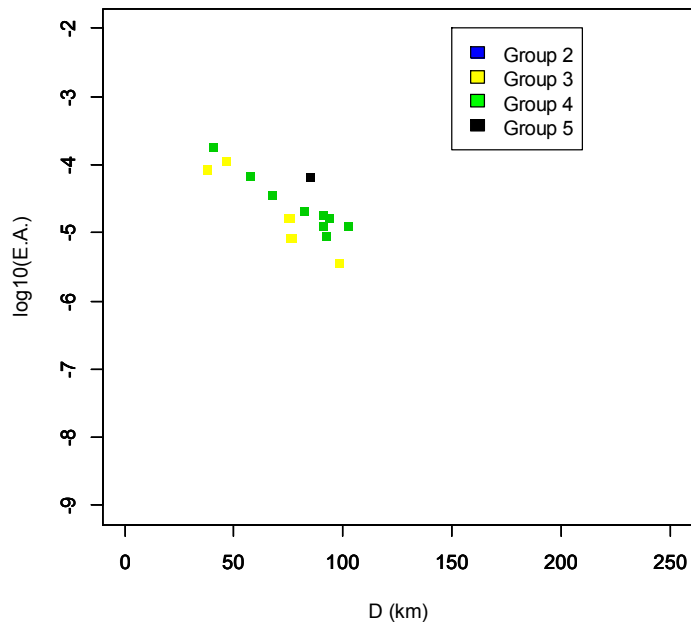
4.3.3 2005 年福岡県西方沖地震における結果

2005 年福岡県西方沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.8, Fig.4.9 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.10 に示す. Fig.4.8 と Fig.4.9 から次のような傾向を見て取れる.

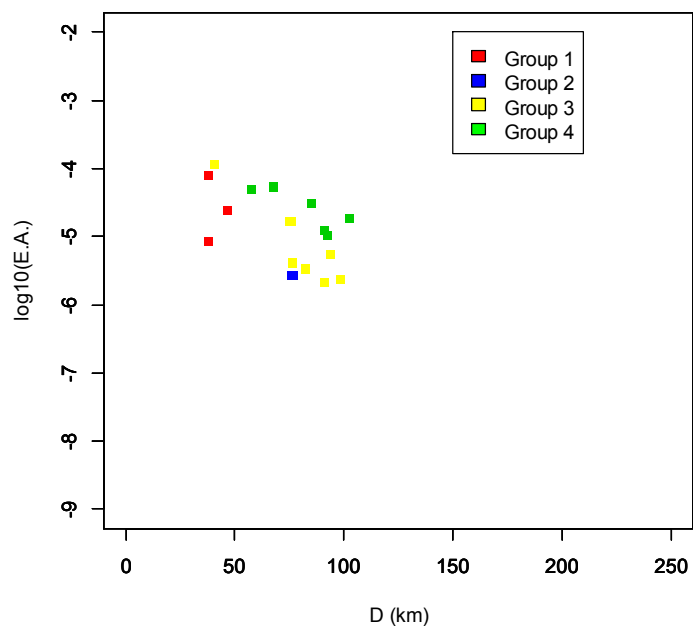
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) どの周波数帯域を見ても Group 間の σ と $E.A.$ の関係の差は小さい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



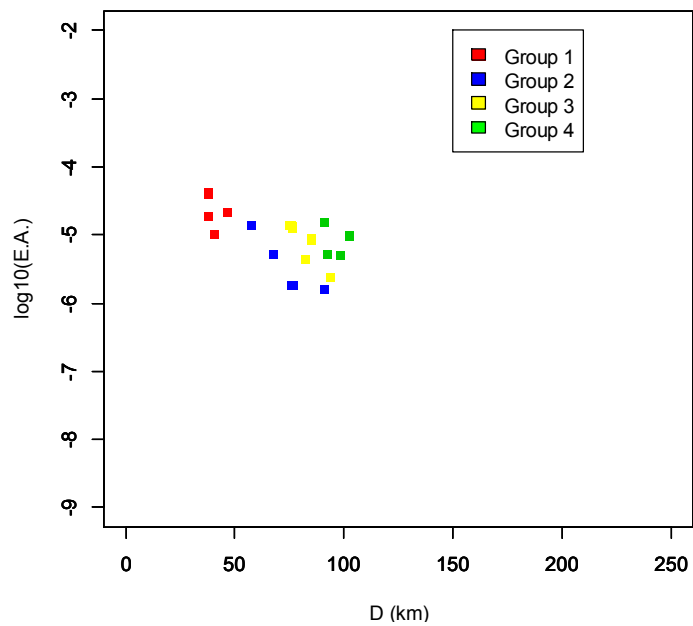
a) 0.1-1.0 Hz



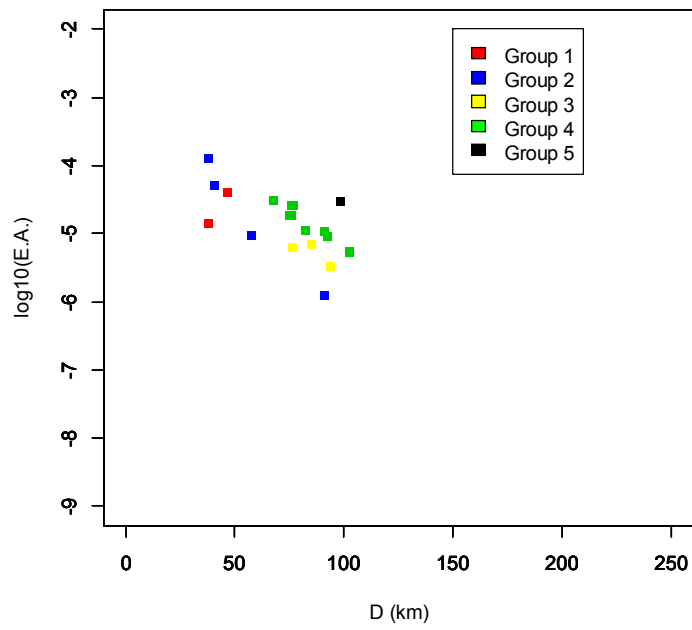
b) 1.0-2.0 Hz



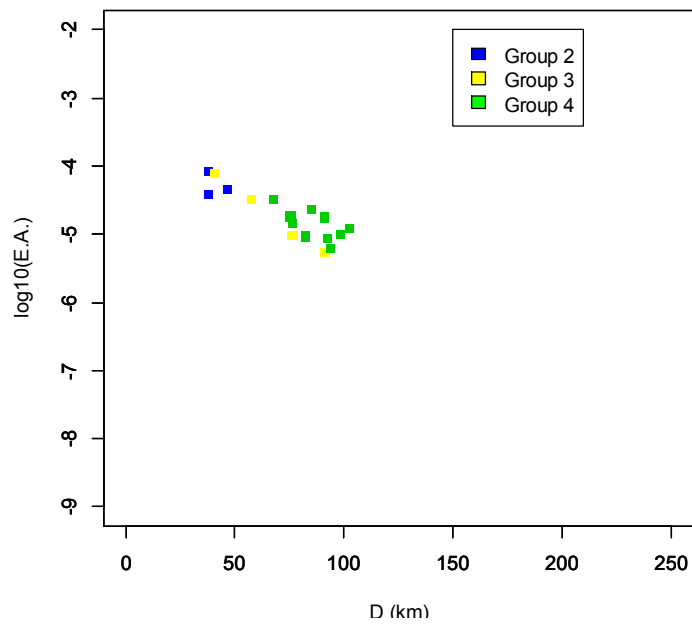
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

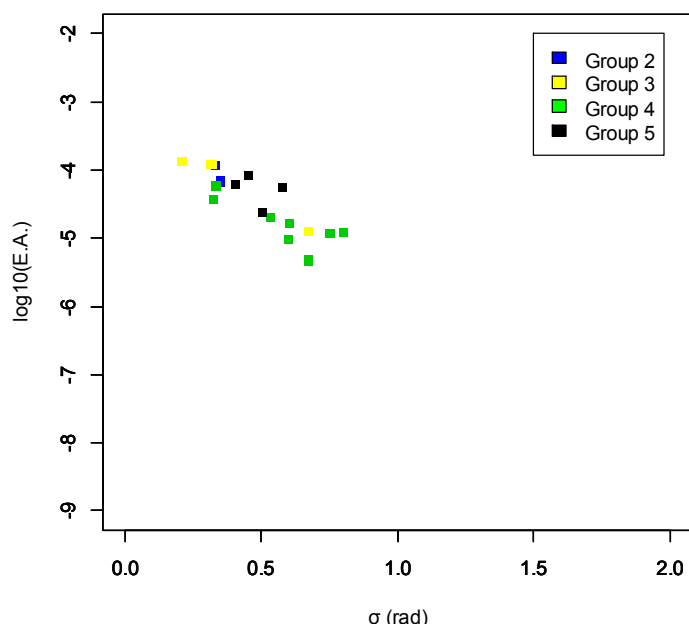


e) 5.0-10.0 Hz

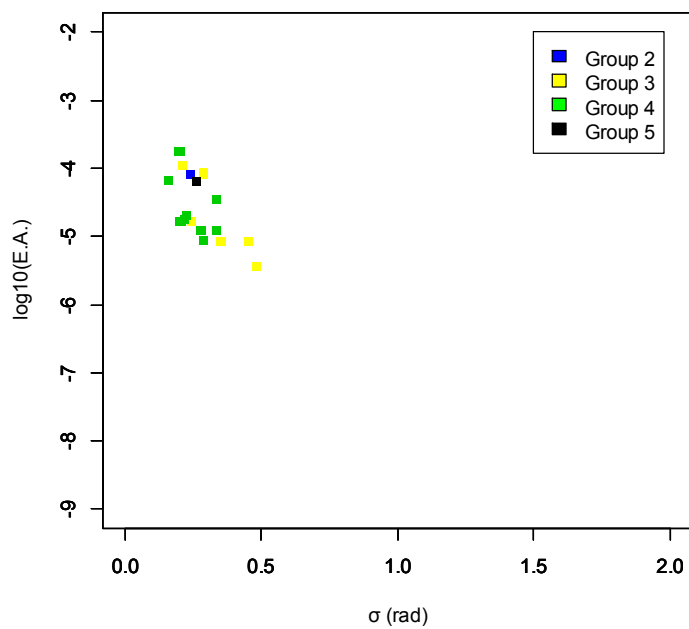


f) 0.1-10.0 Hz

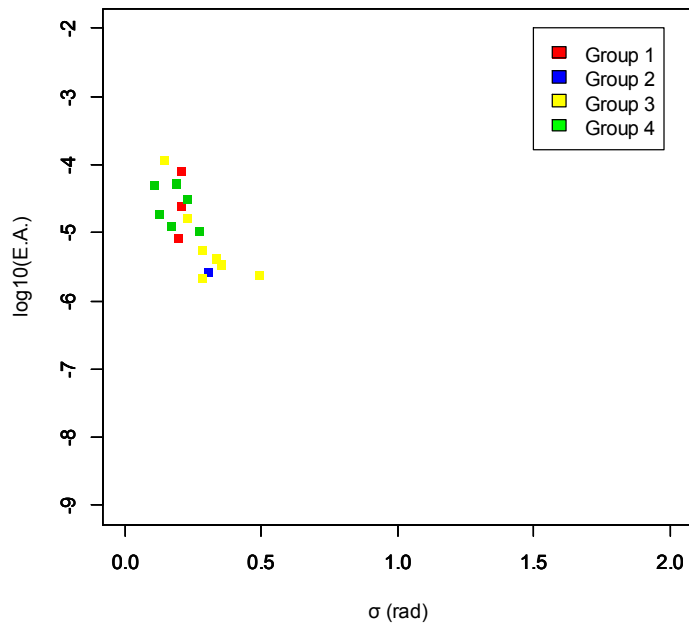
Fig.4.8: relations between D and $E.A.$ for 2005 Fukuokaken seihouoki earthquake



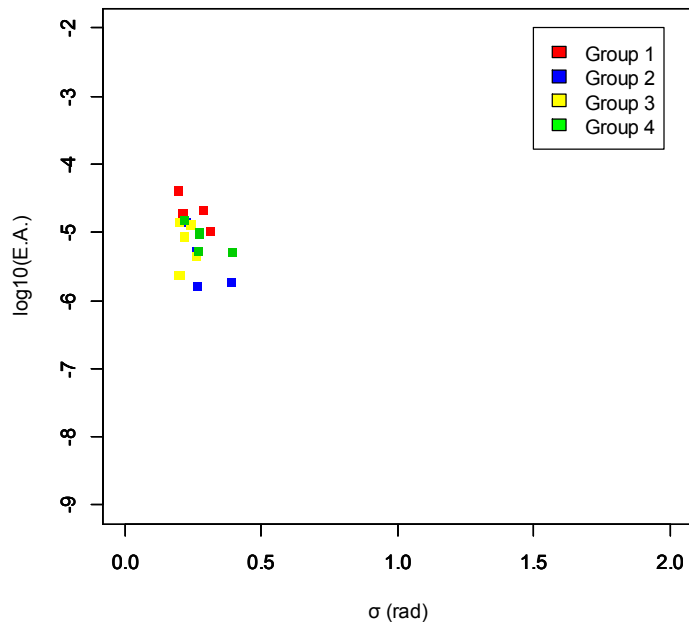
a) 0.1-1.0 Hz



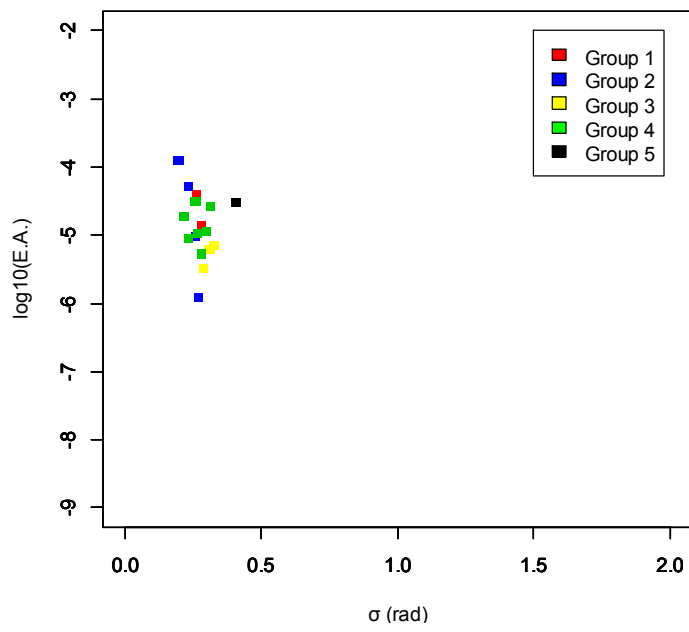
b) 1.0-2.0 Hz



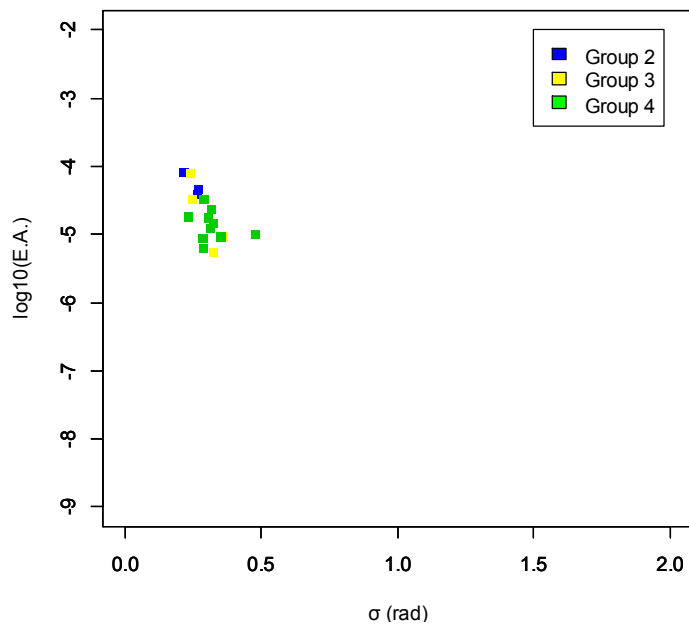
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

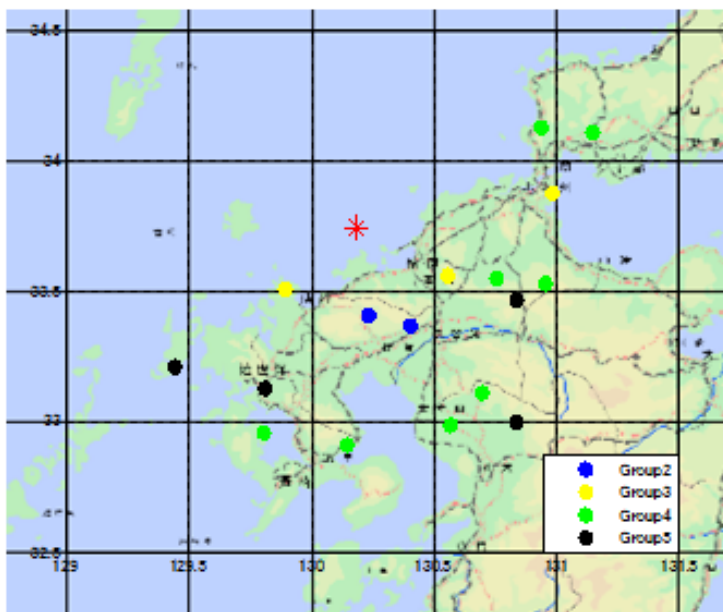


e) 5.0-10.0 Hz

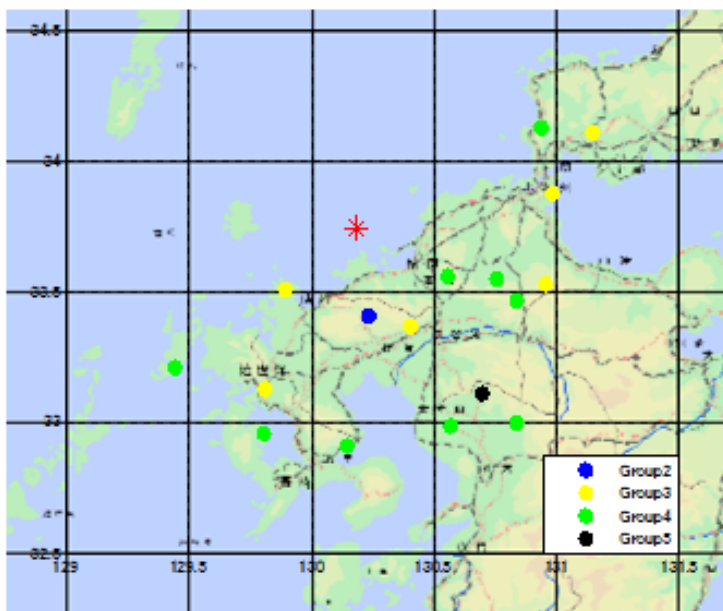


f) 0.1-10.0 Hz

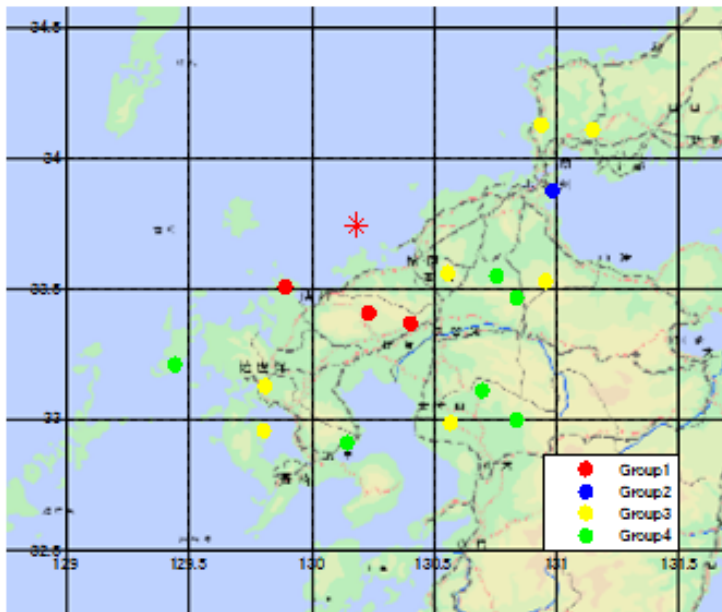
Fig.4.9: relations between σ and $E.A.$ for 2005 Fukuokaken seihouoki earthquake



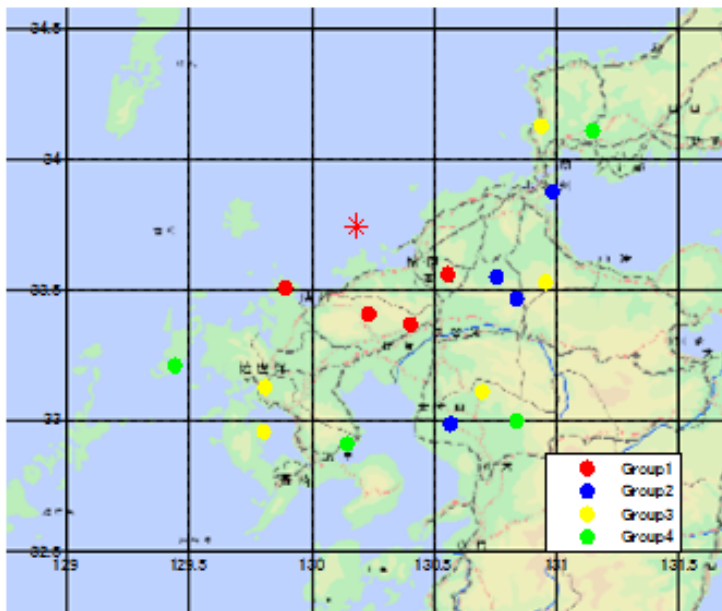
a) 0.1 – 1.0 Hz



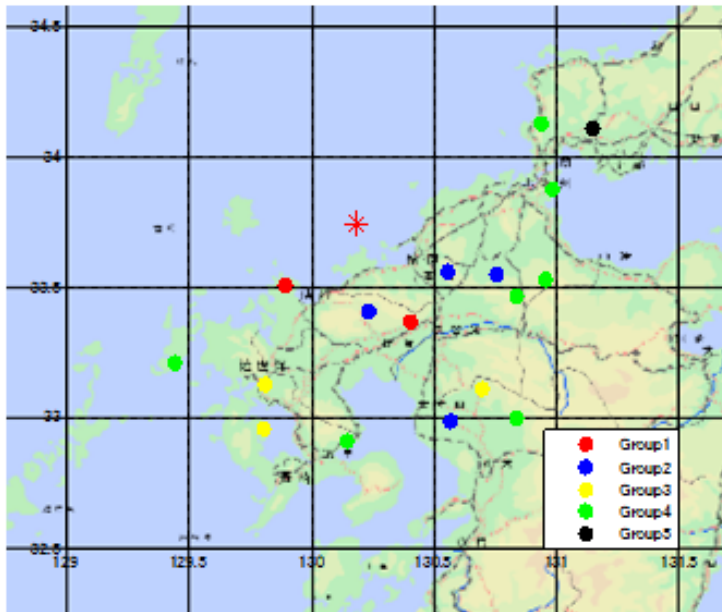
b) 1.0 – 2.0 Hz



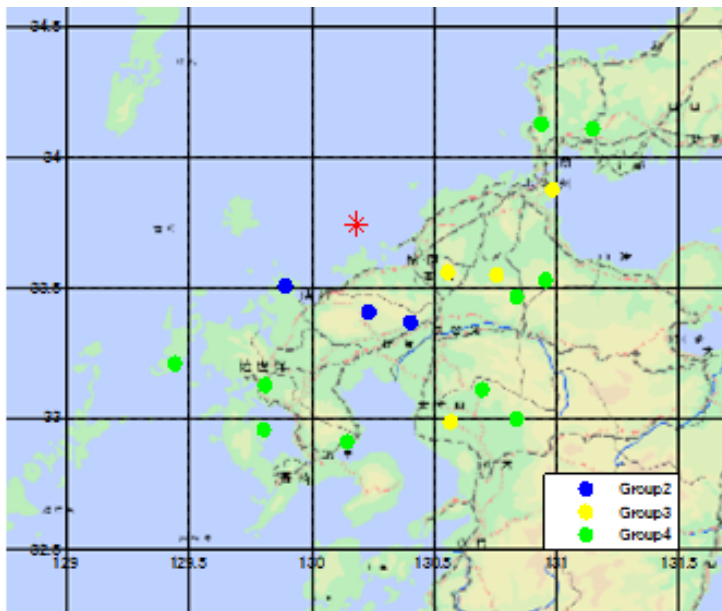
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



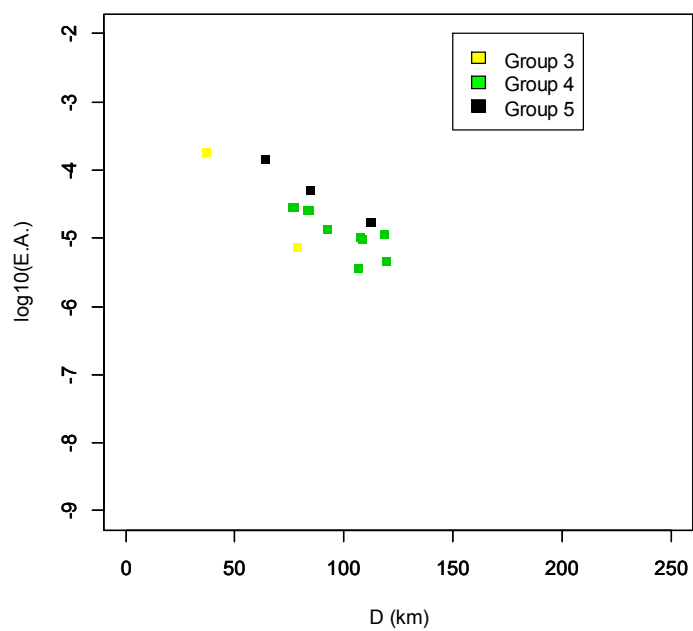
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.10: locations of sites in each Group for 2005 Fukuokaken seihouki earthquake

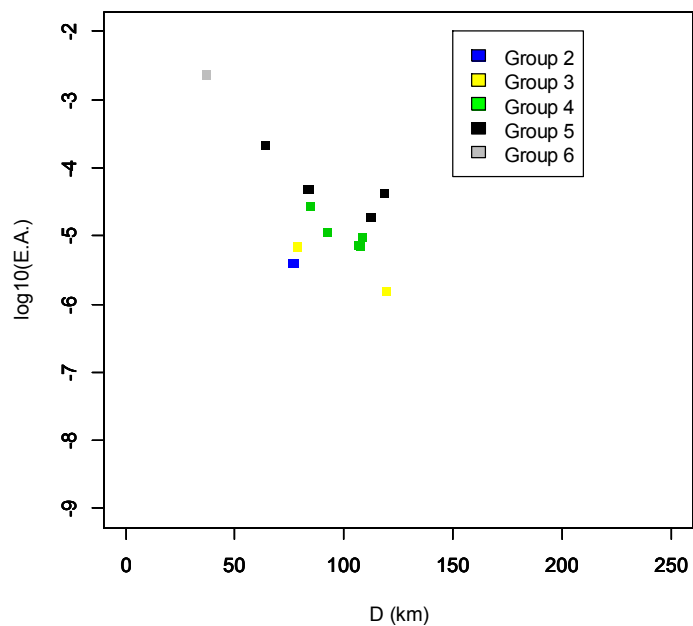
4.3.4 2007 年能登半島沖地震における結果

2007 年能登半島沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.11, Fig.4.12 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.13 に示す. Fig.4.11 と Fig.4.12 から次のような傾向を見て取れる.

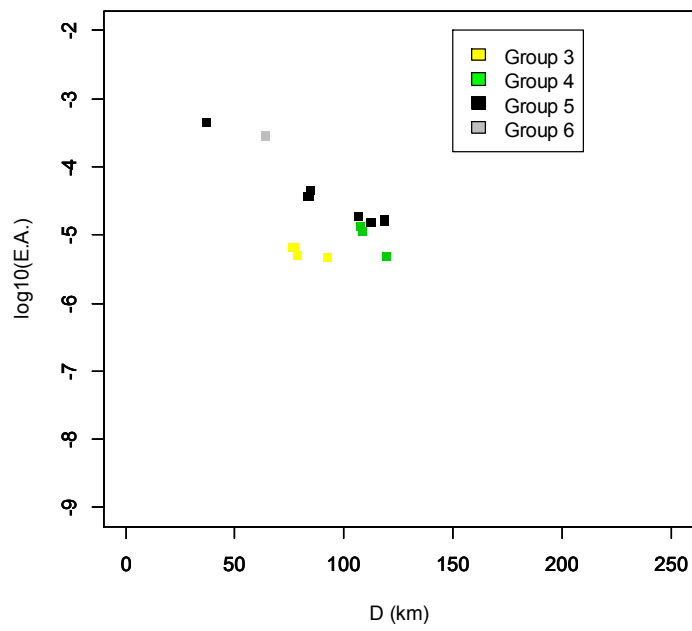
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また (Group6 以外の) Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz 以外の周波数帯域では Group 間の σ と $E.A.$ の関係の差は小さい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる.



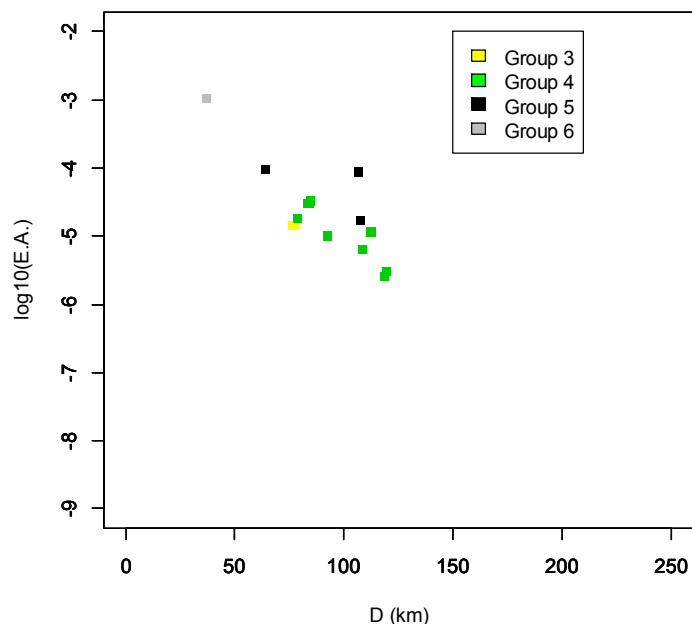
a) 0.1-1.0 Hz



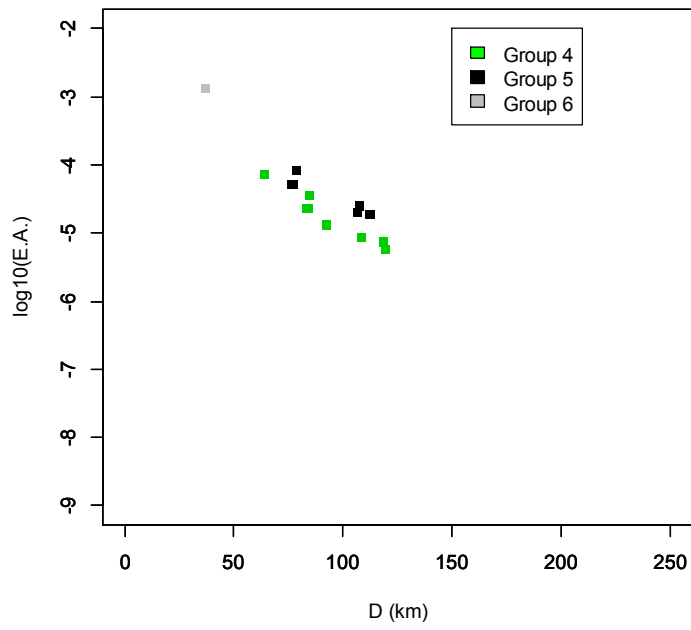
b) 1.0-2.0 Hz



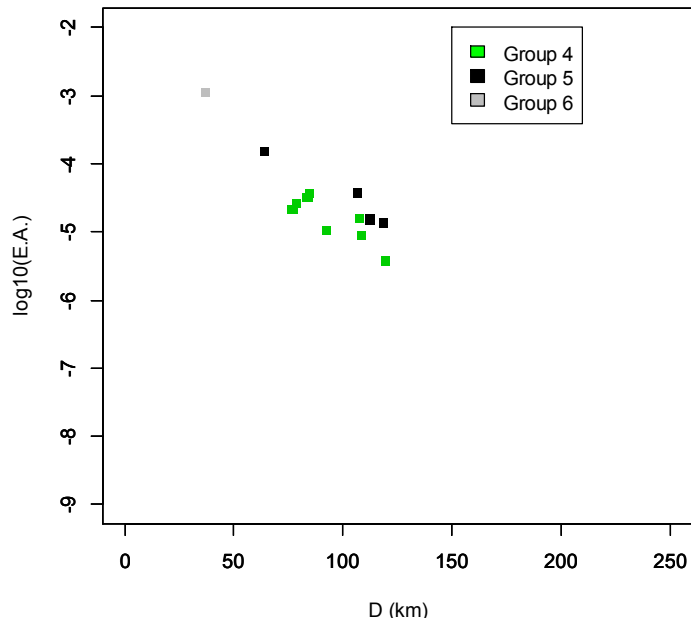
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

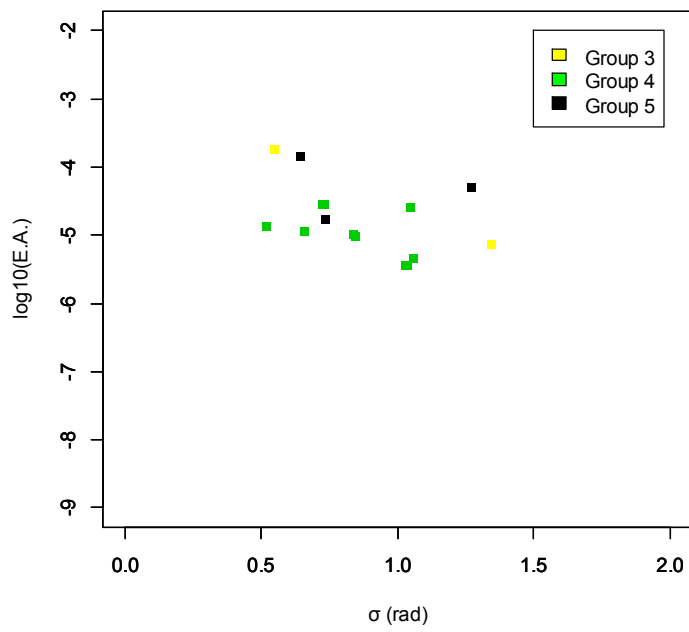


e) 5.0-10.0 Hz

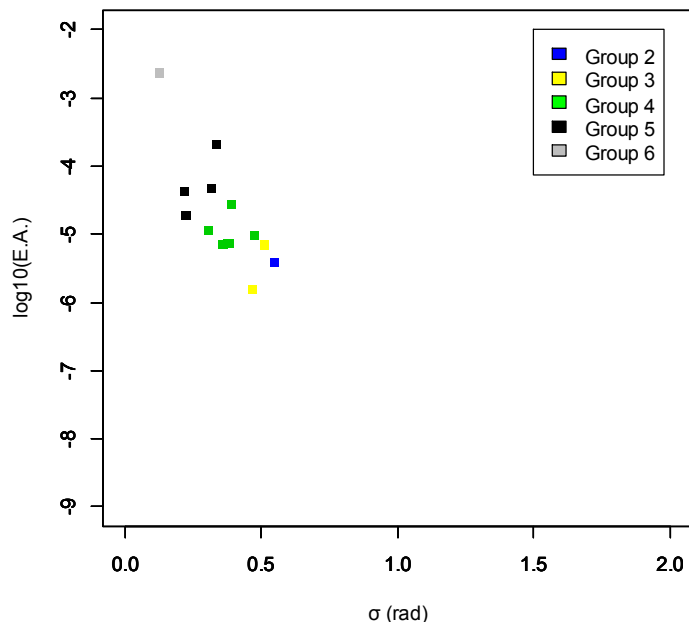


f) 0.1-10.0 Hz

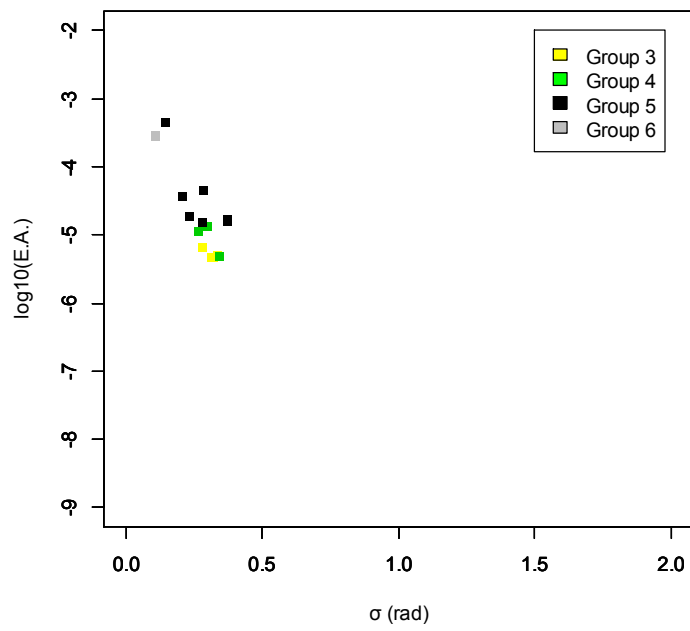
Fig.4.11: relations between D and $E.A.$ for 2007 Notohanto oki earthquake



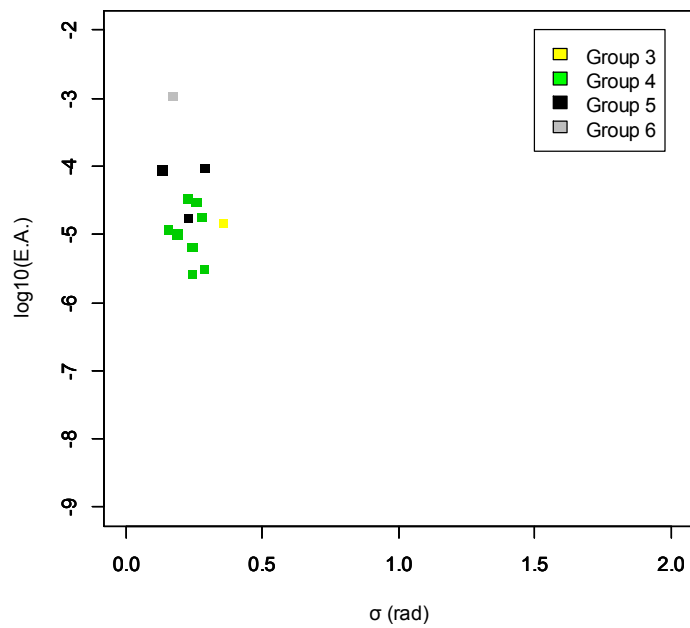
a) 0.1-1.0 Hz



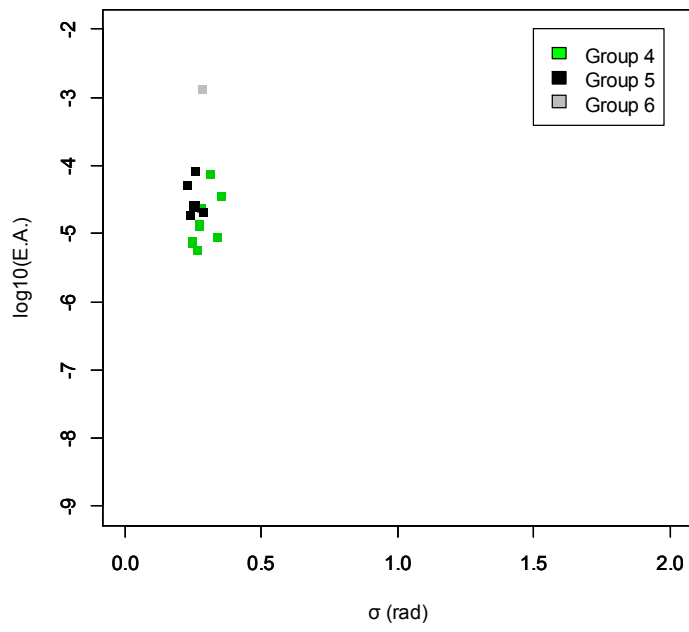
b) 1.0-2.0 Hz



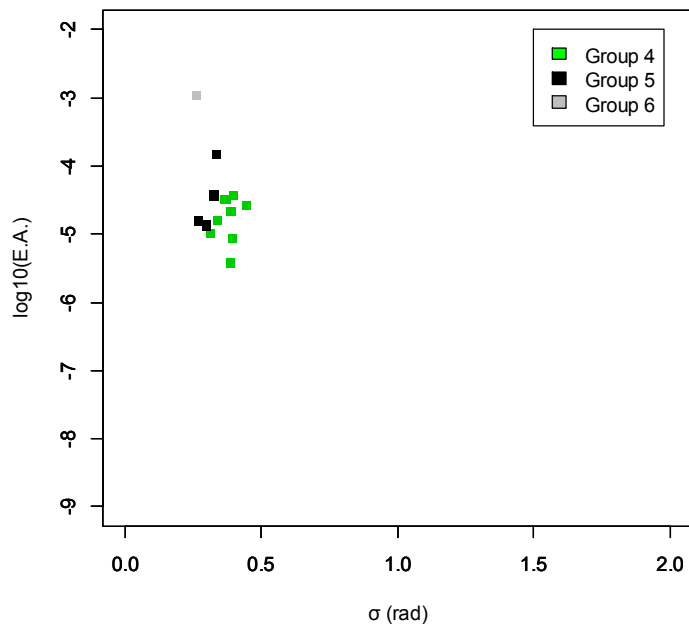
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

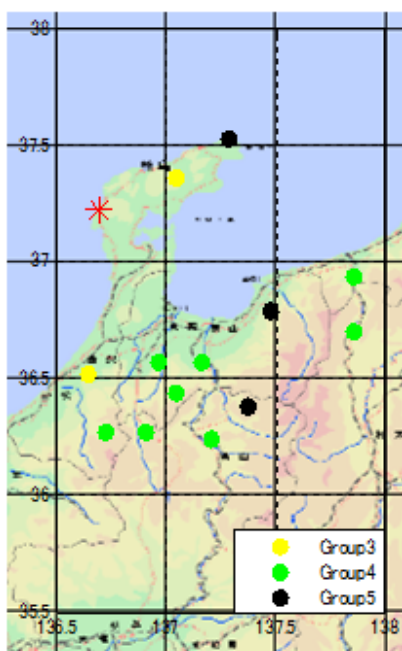


e) 5.0-10.0 Hz

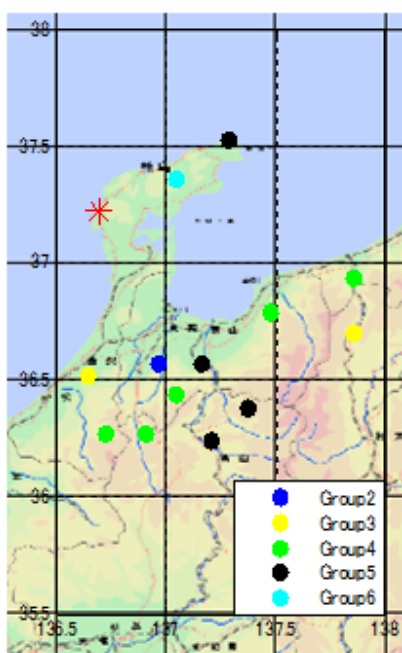


f) 0.1-10.0 Hz

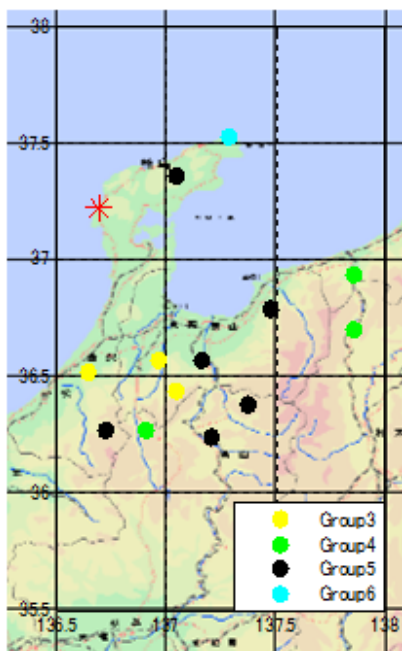
Fig.4.12: relations between σ and $E.A.$ for 2007 Notohanto oki earthquake



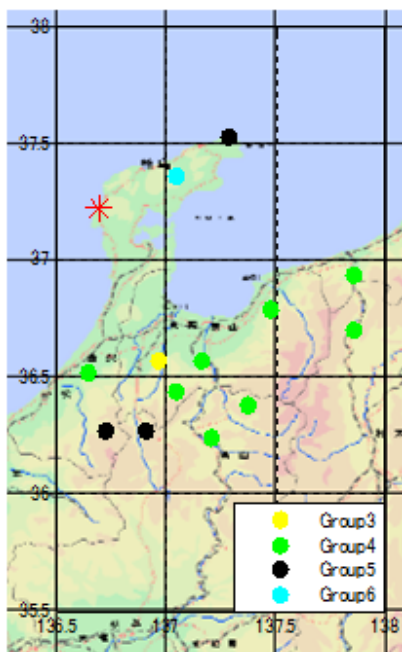
a) 0.1 – 1.0 Hz



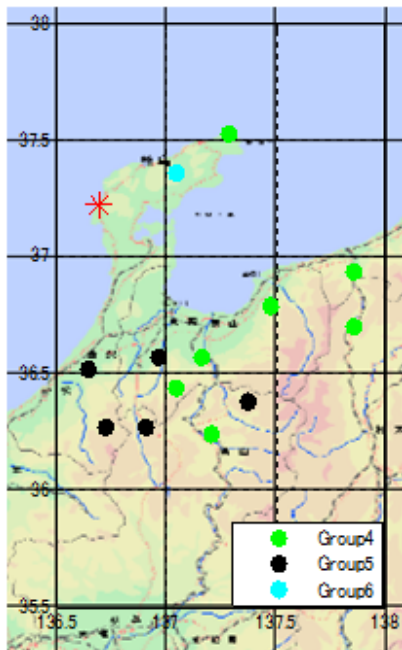
b) 1.0 – 2.0 Hz



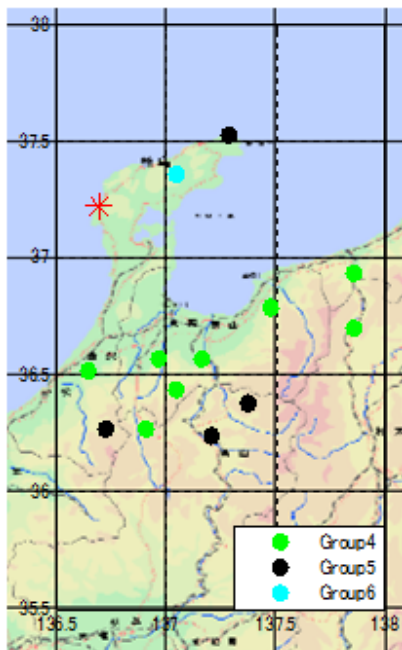
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



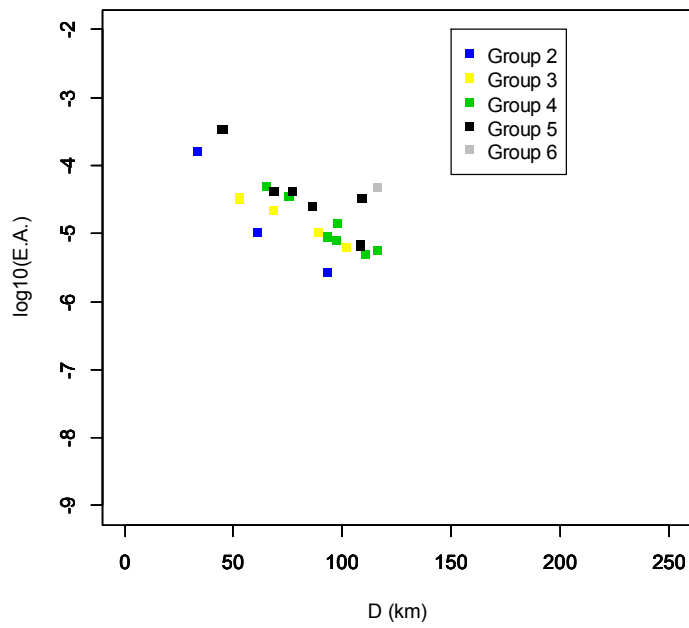
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.13: locations of sites in each Group for 2007 Notohanto oki earthquake

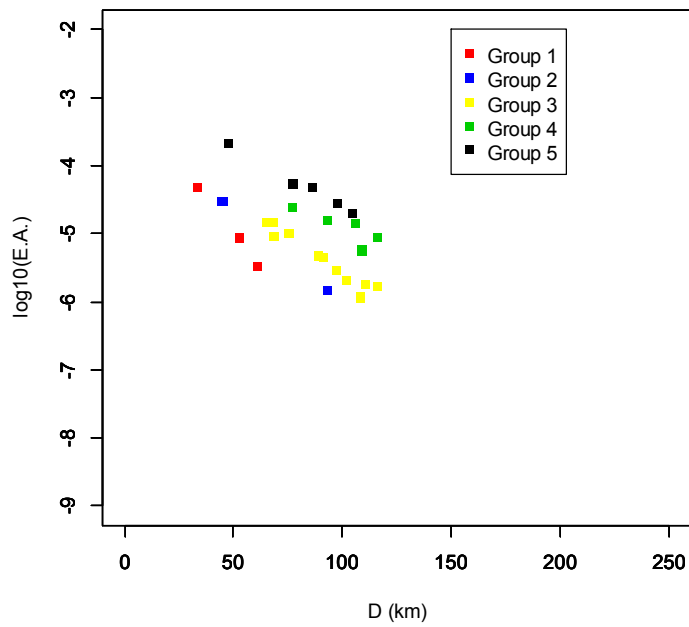
4.3.5 2007 年新潟県中越沖地震における結果

2007 年新潟県中越沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.14, Fig.4.15 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.16 に示す. Fig.4.14 と Fig.4.15 から次のような傾向を見て取れる.

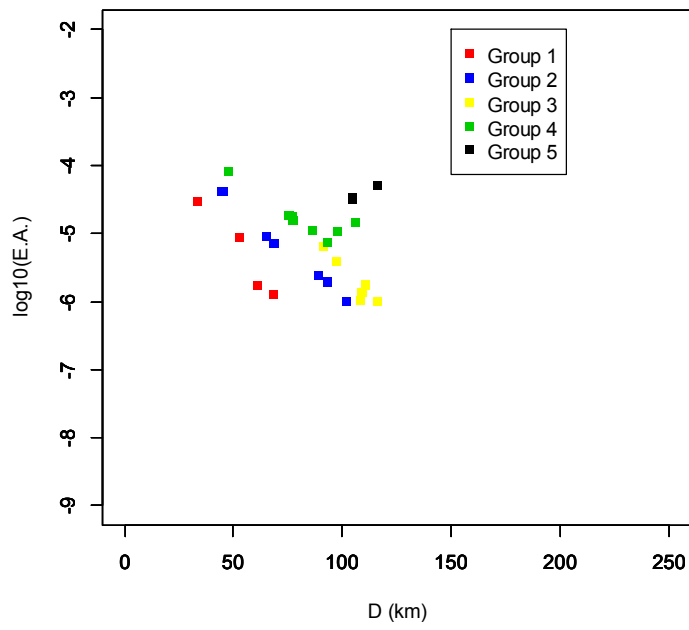
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz における Group 間の σ と $E.A.$ の関係の差は大きい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる. しかし 3.0 – 5.0 Hz や 5.0 – 10.0 Hz において σ が大きいにも関わらず, $E.A.$ が大きいサイトもある.



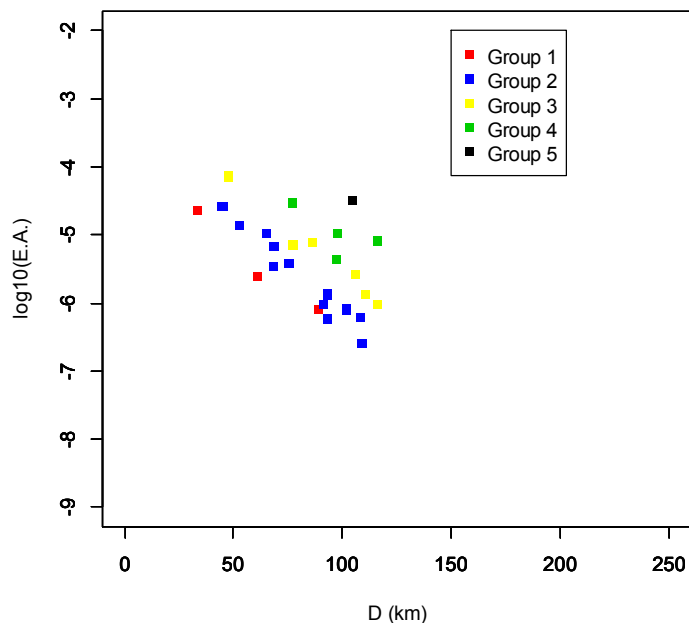
a) 0.1-1.0 Hz



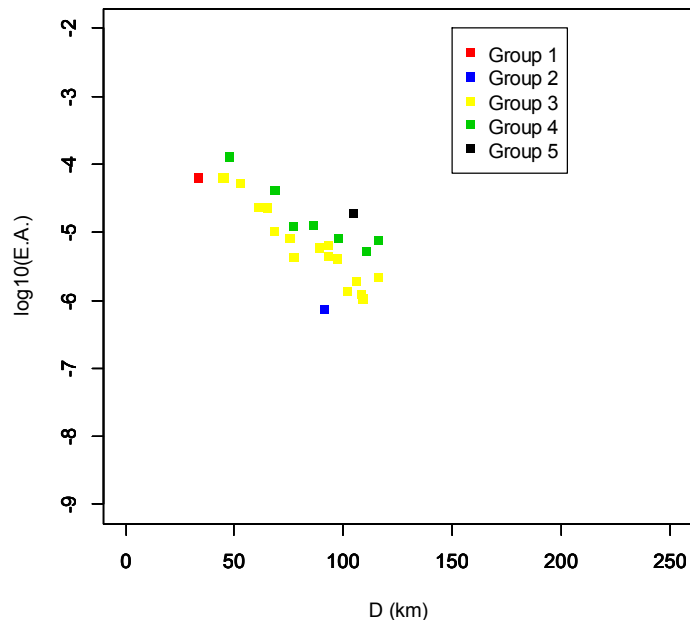
b) 1.0-2.0 Hz



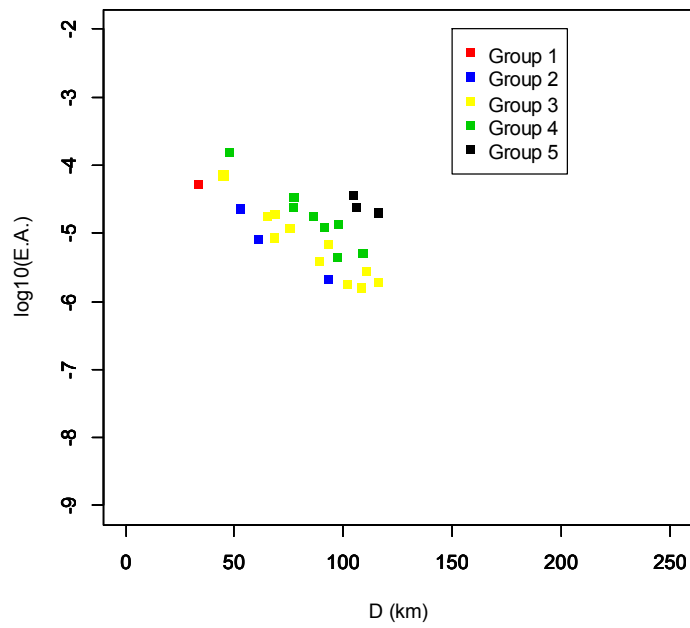
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

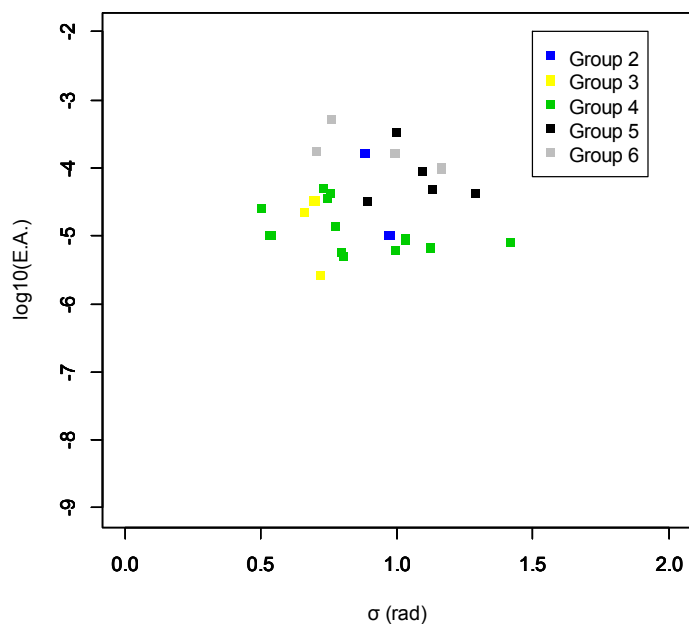


e) 5.0-10.0 Hz

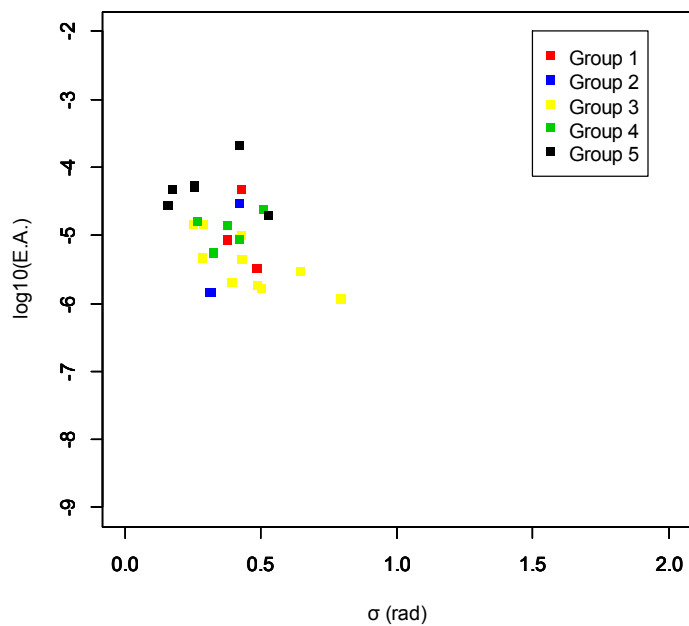


f) 0.1-10.0 Hz

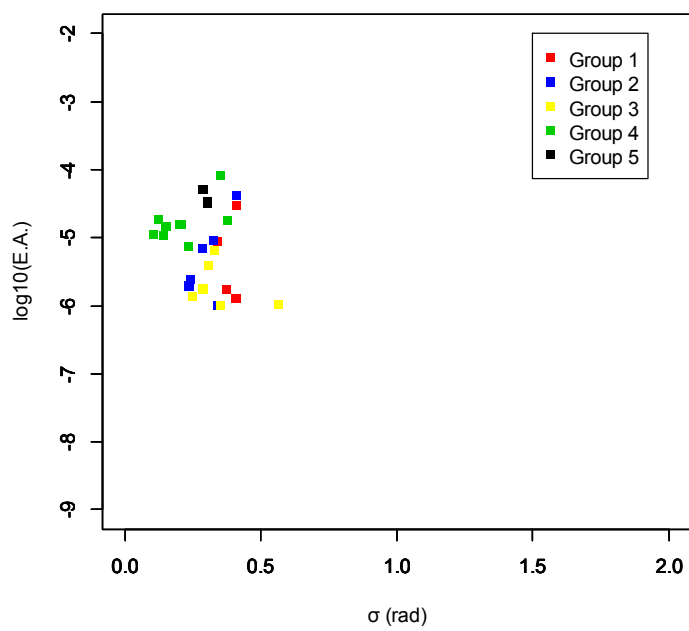
Fig 4.14: relations between D and $E.A.$ for 2007 Niigataken chuetsuoki earthquake



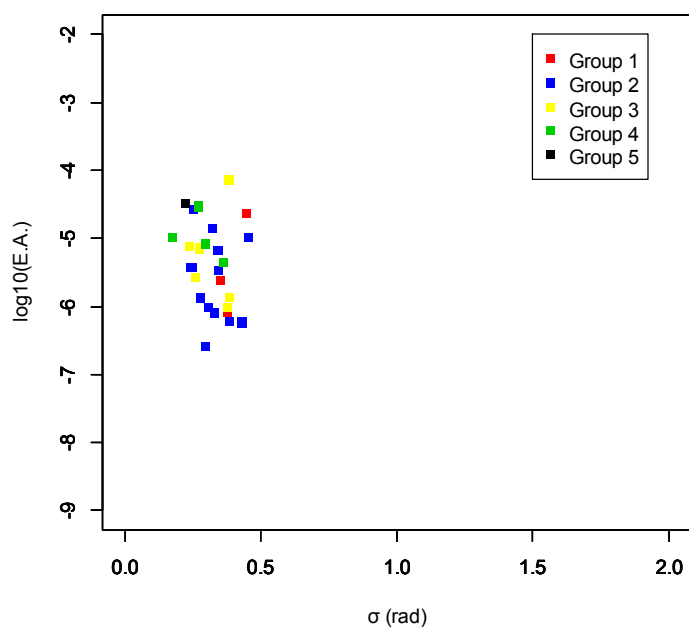
a) 0.1-1.0 Hz



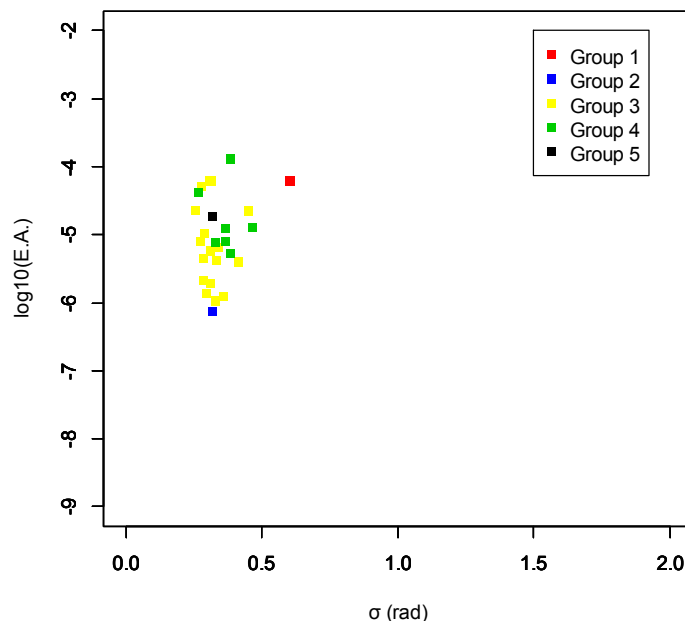
b) 1.0-2.0 Hz



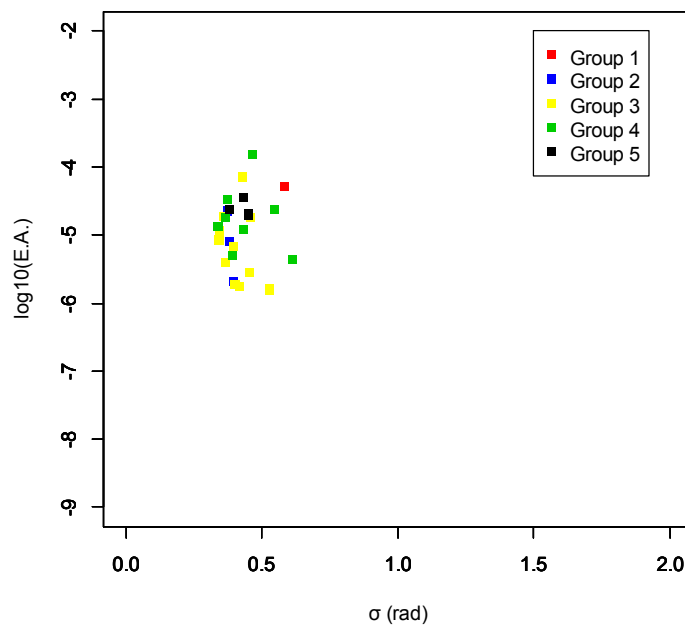
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

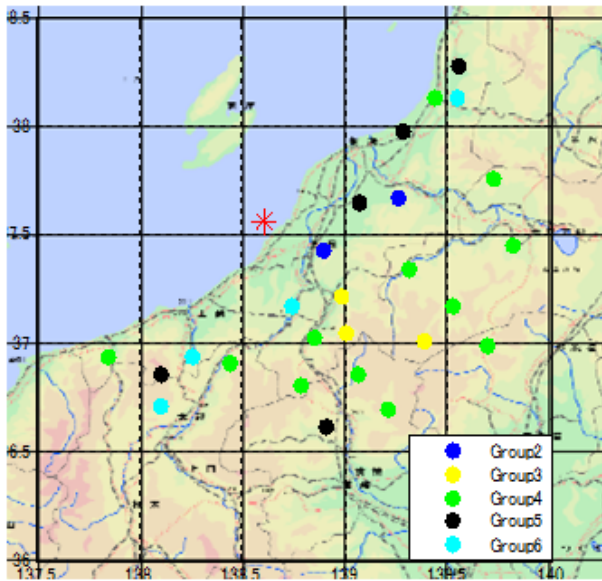


e) 5.0-10.0 Hz

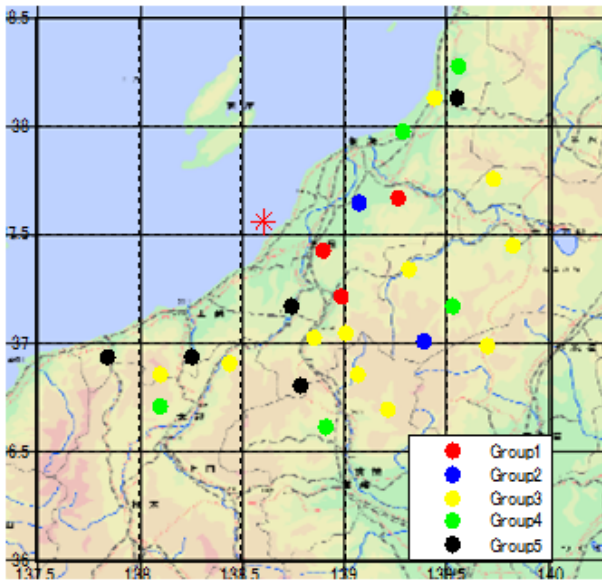


f) 0.1-10.0 Hz

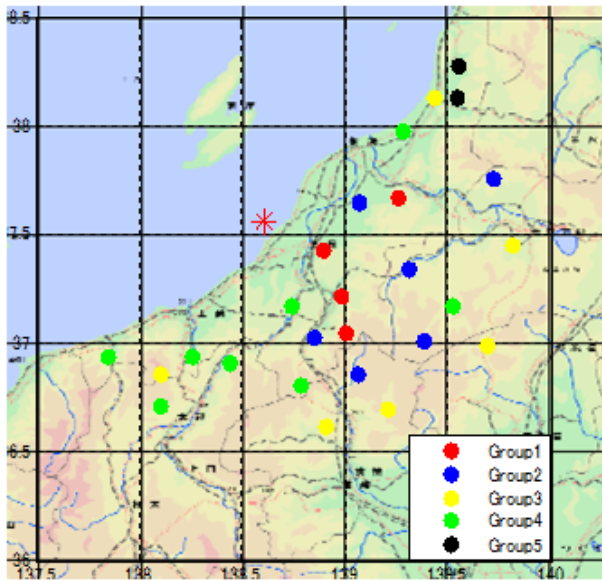
Fig.4.15: relations between D and $E.A.$ for 2007 Niigataken chuetsuoki earthquake



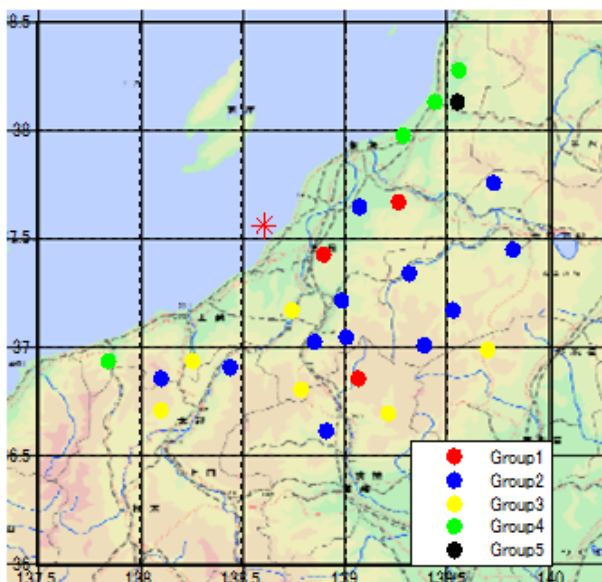
a) 0.1 – 1.0 Hz



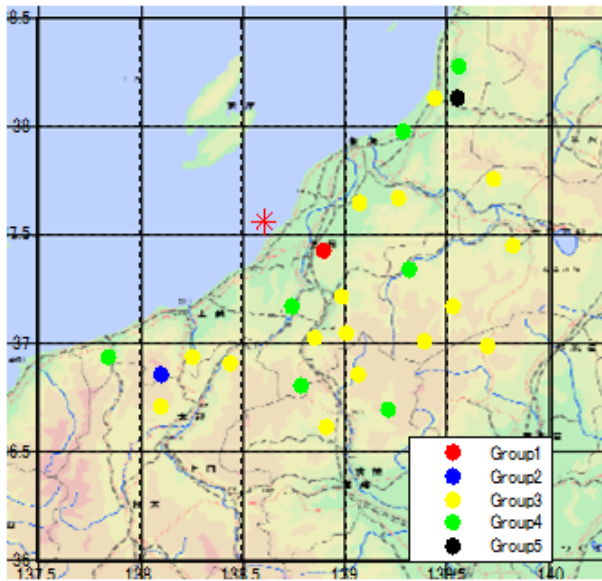
b) 1.0 – 2.0 Hz



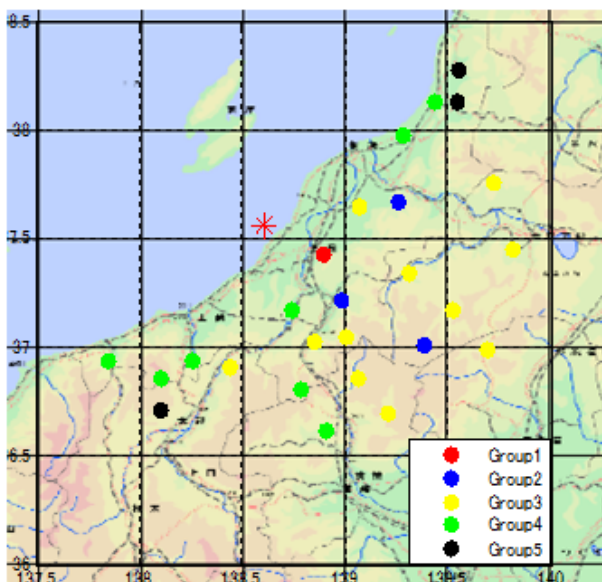
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.16: locations of sites in each Group for 2007 Niigata Chuetsuoki earthquake

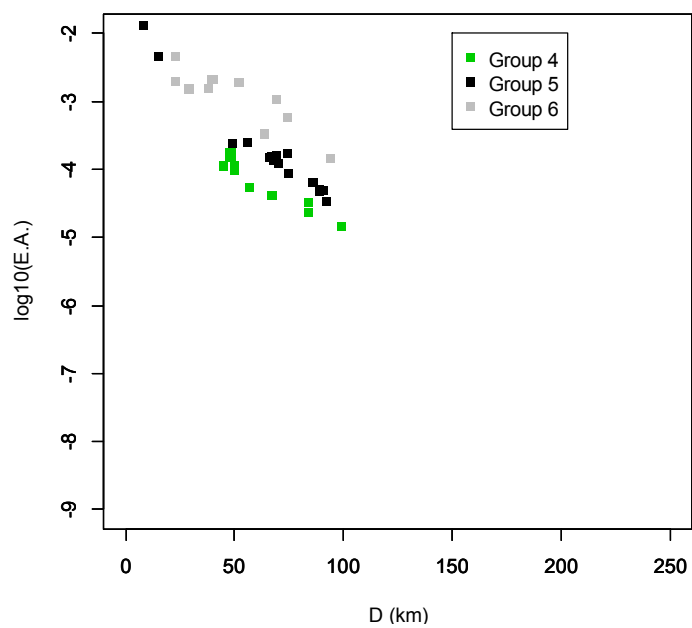
4.3.6 2008 年岩手・宮城内陸地震における結果

2008 年岩手・宮城内陸地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.17, Fig.4.18 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.19 に示す. Fig.4.17 と Fig.4.18 から次のような傾向を見て取れる.

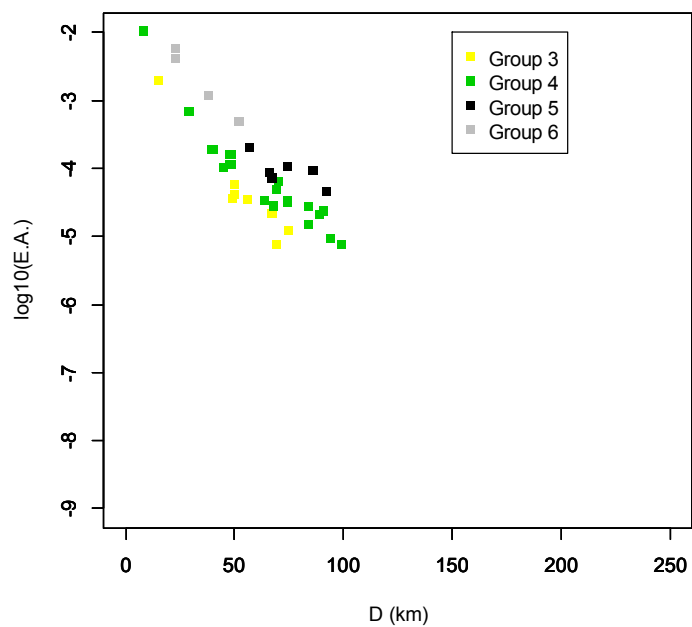
ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である

イ) 0.1 – 1.0 Hz において Group 間の σ と $E.A.$ の関係の差が大きい.

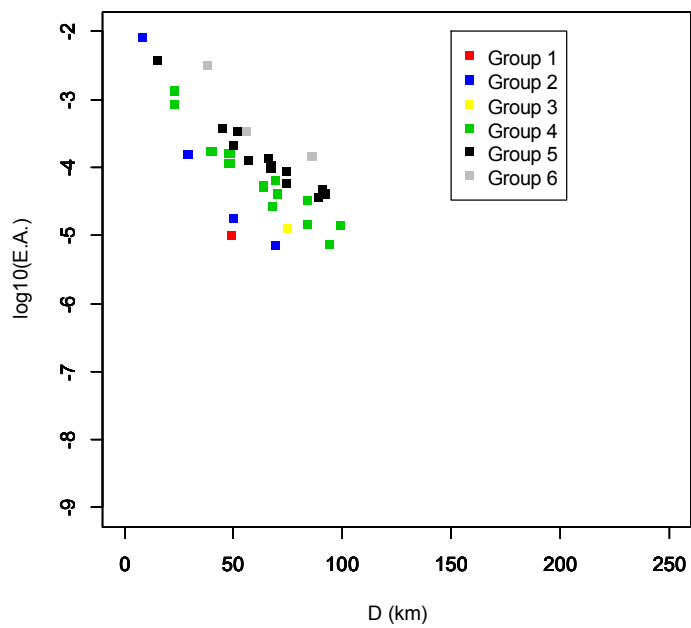
イ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



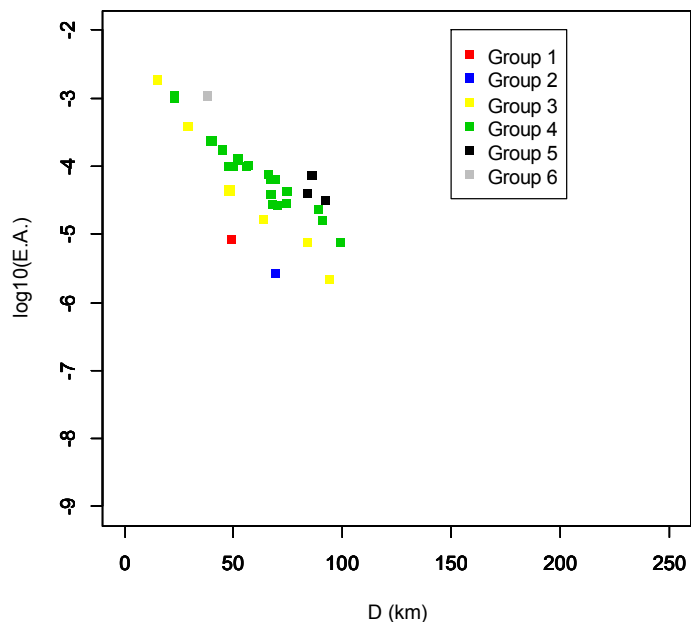
a) 0.1-1.0 Hz



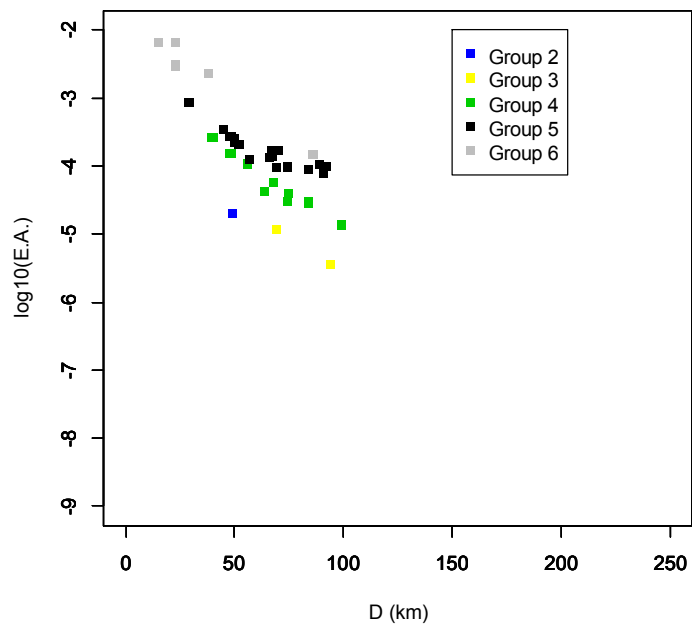
b) 1.0-2.0 Hz



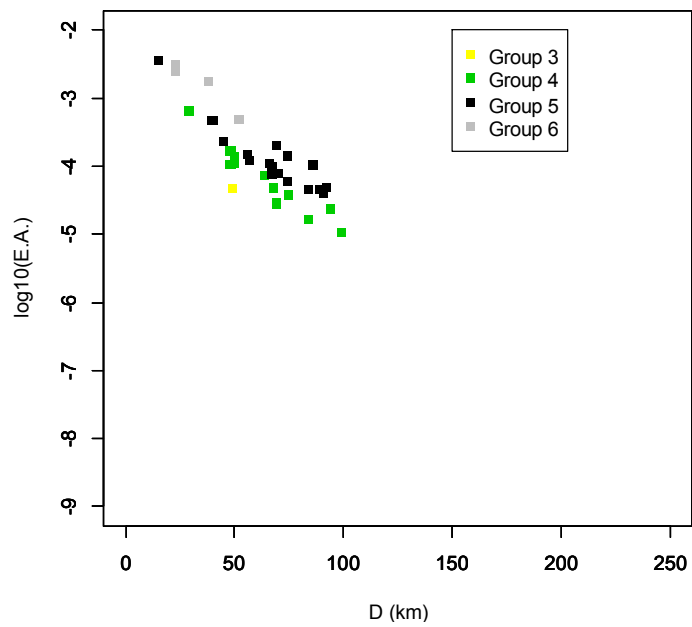
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

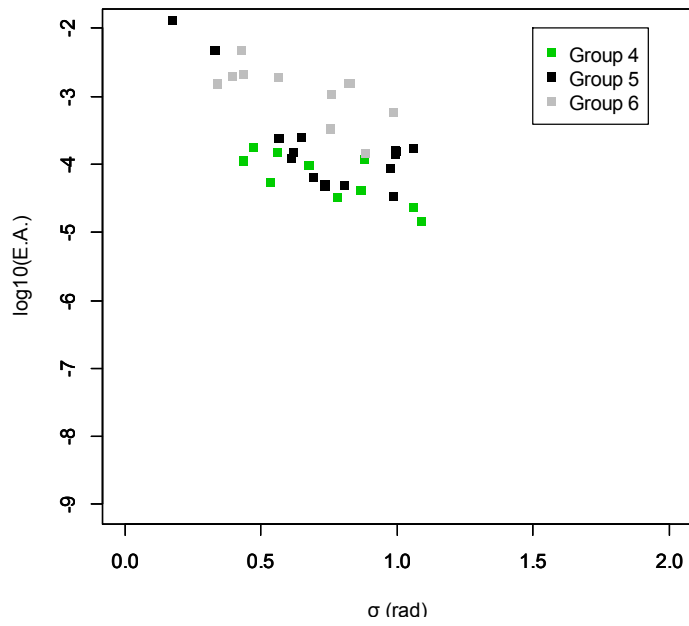


e) 5.0-10.0 Hz

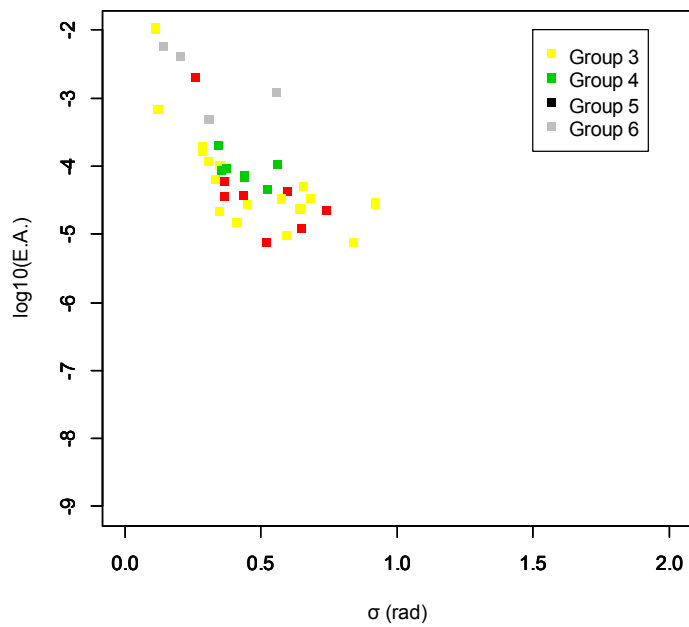


f) 0.1-10.0 Hz

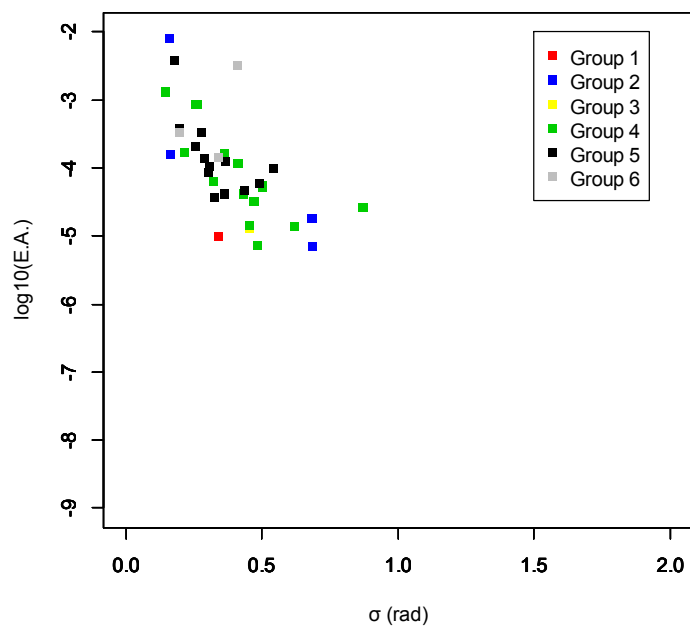
Fig.4.17: relations between D and $E.A.$ for 2008 Iwate-Miyagi nairiku earthquake



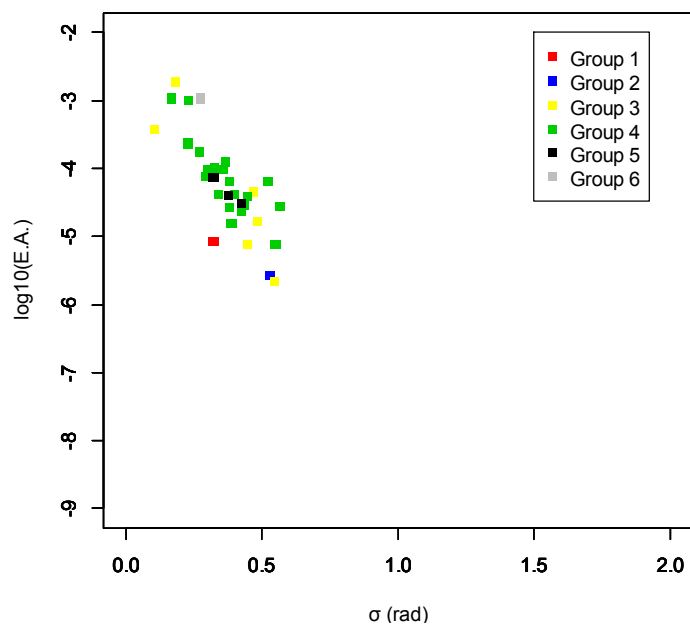
a) 0.1-1.0 Hz



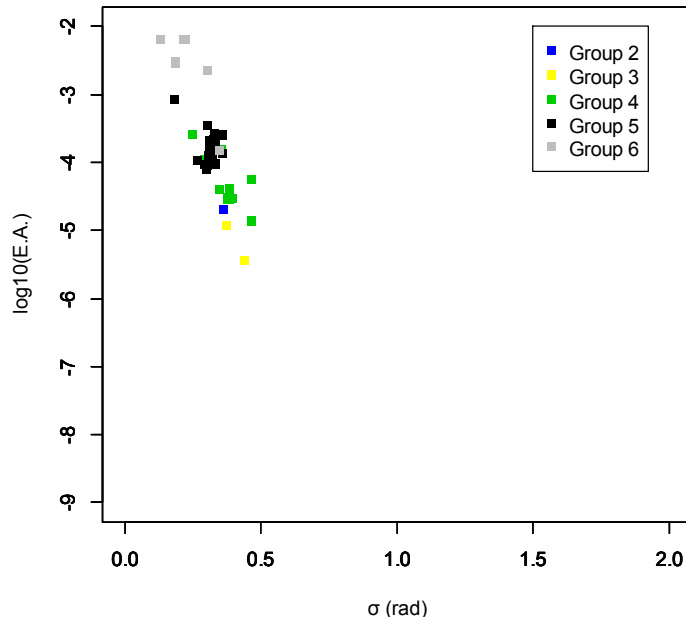
b) 1.0-2.0 Hz



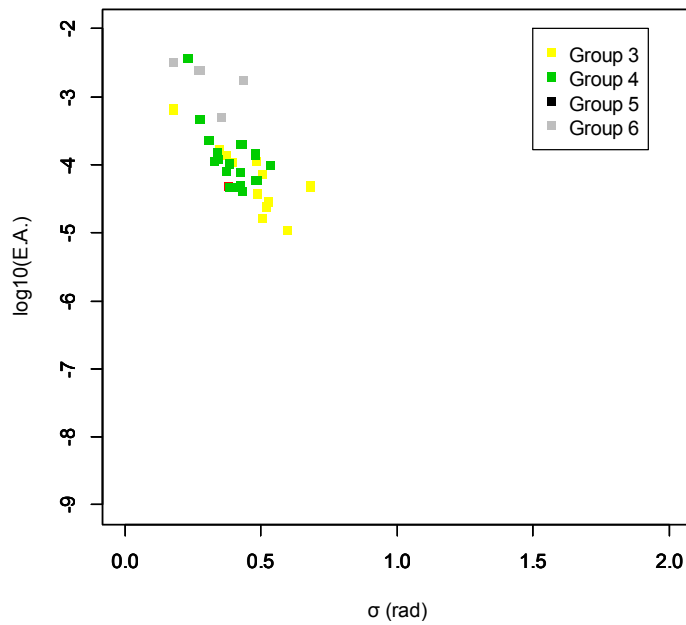
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

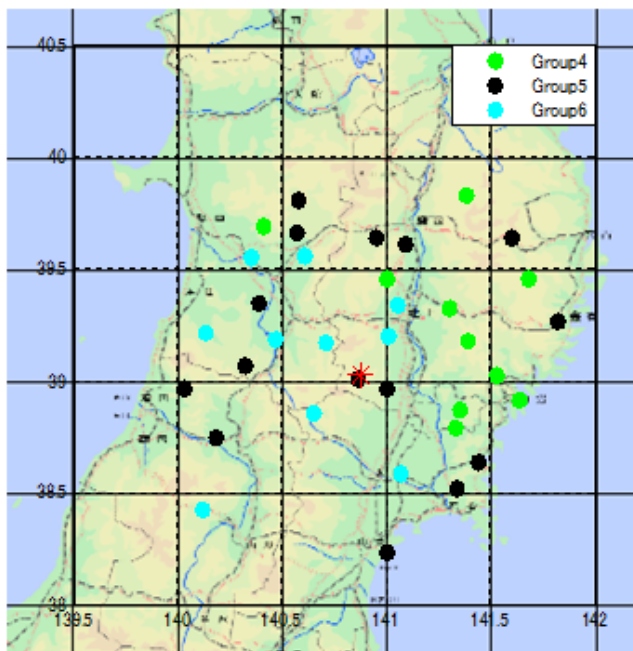


e) 5.0-10.0 Hz

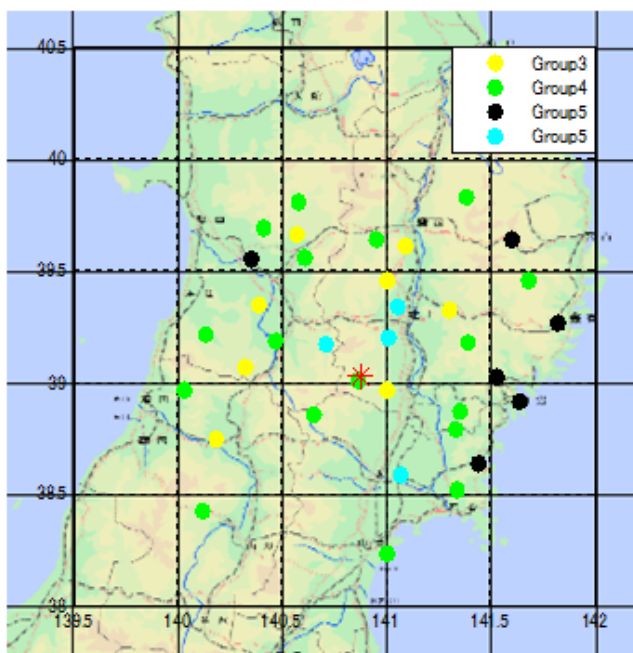


f) 0.1-10.0 Hz

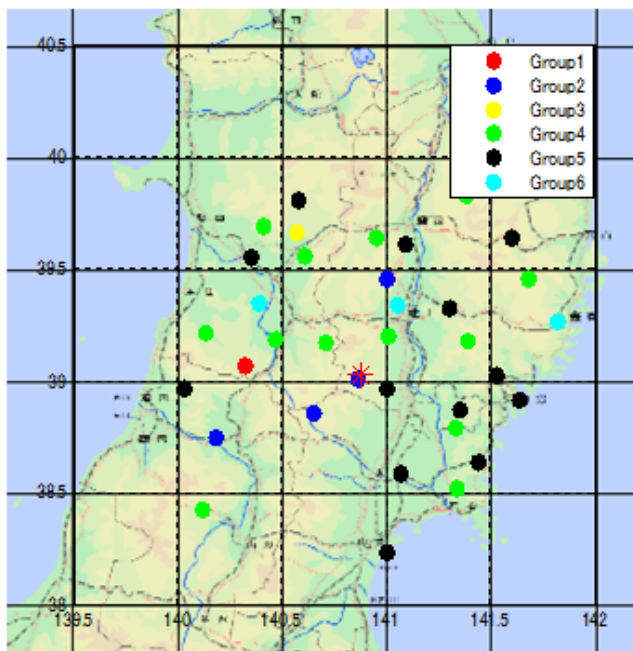
Fig.4.18: relations between σ and $E.A.$ for 2008 Iwate-Miyagi nairiku earthquake



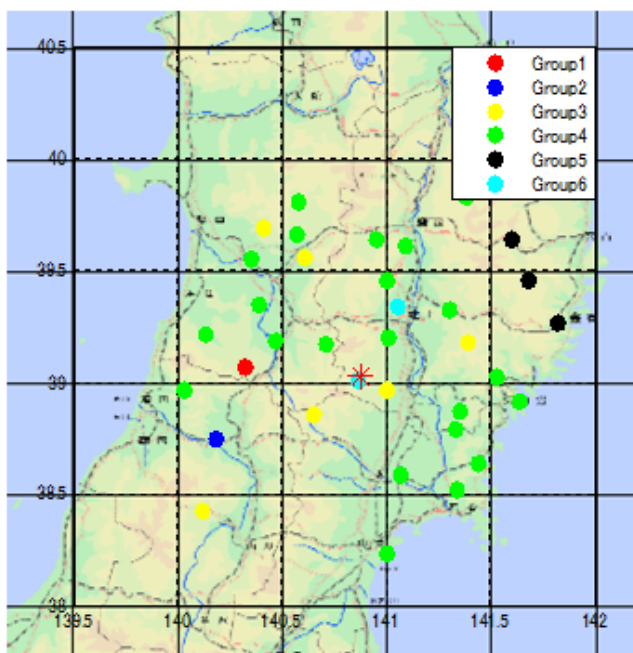
a) 0.1 – 1.0 Hz



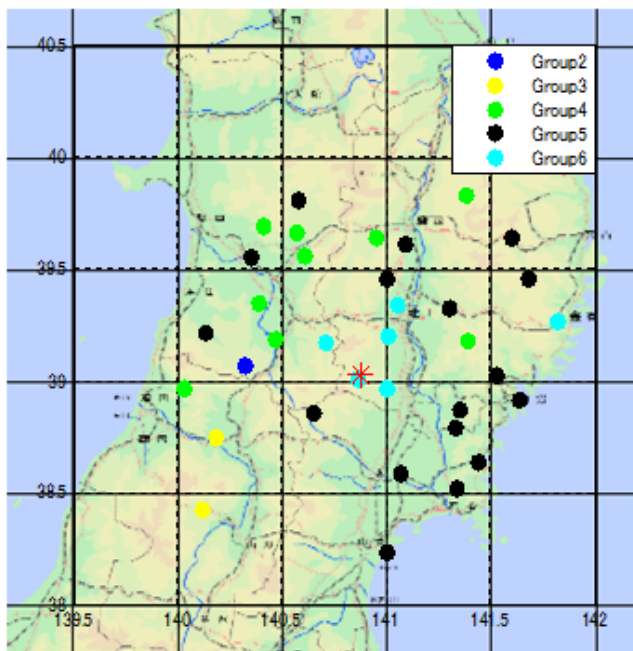
b) 1.0 – 2.0 Hz



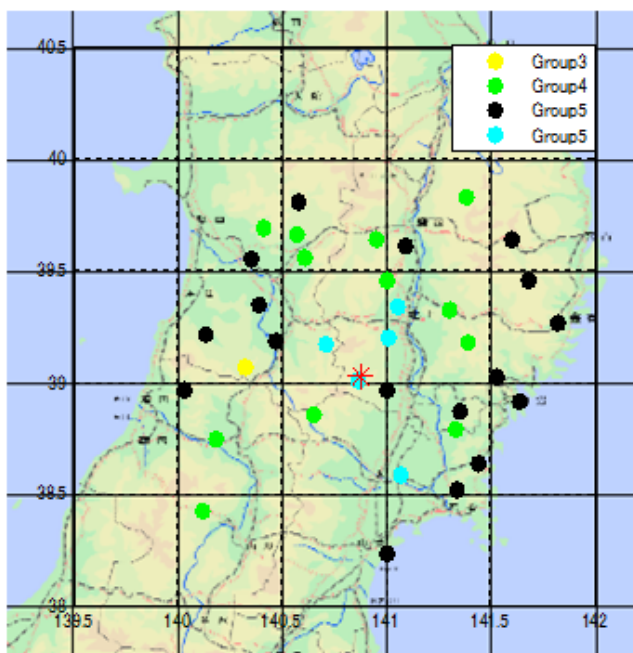
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



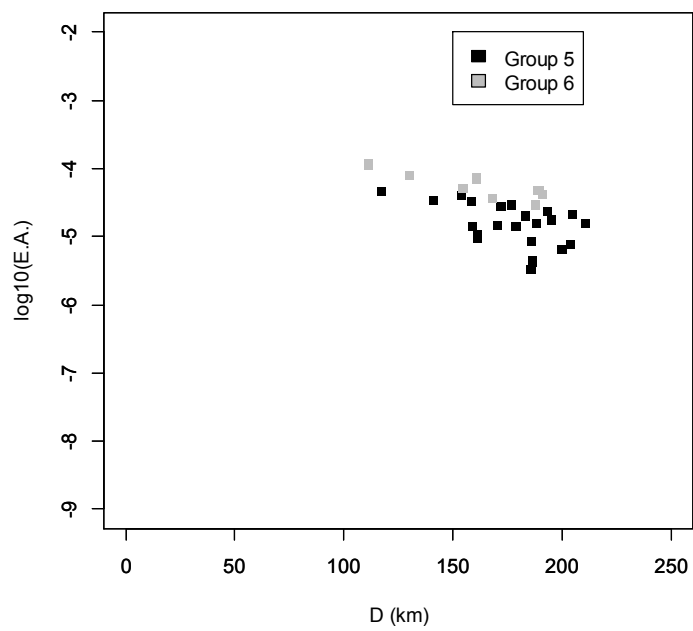
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.19: locations of sites in each Group for 2008 Iwate-Miyagi earthquake

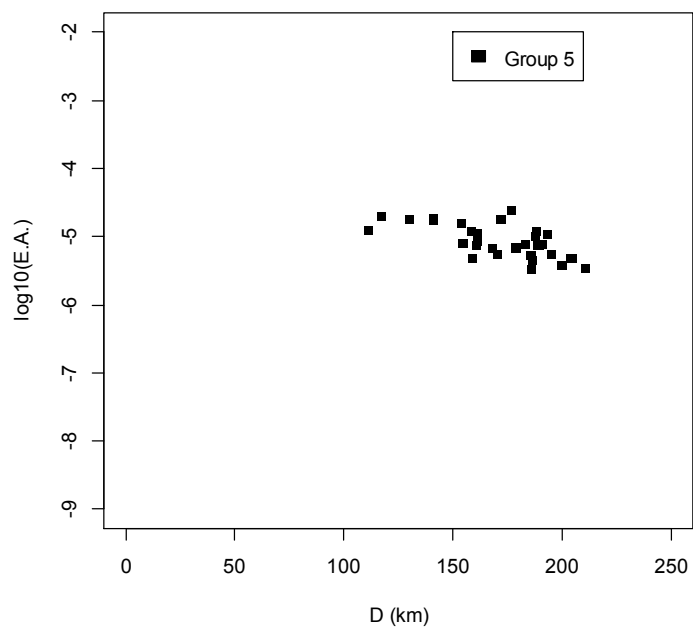
4.3.7 2003 年十勝沖地震における結果

2003 年十勝沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.20, Fig.4.21 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.22 に示す. Fig.4.20 と Fig.4.21 から次のような傾向を見て取れる.

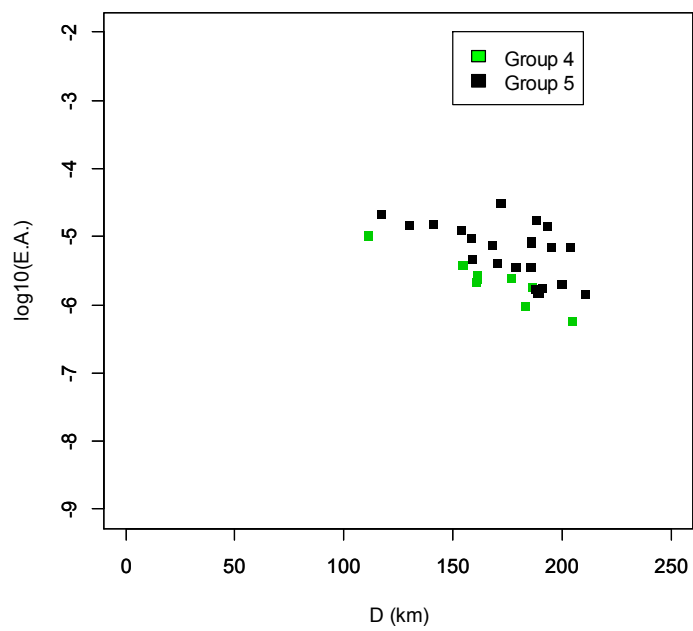
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係はほぼフラットであり, ばらつきも大きい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



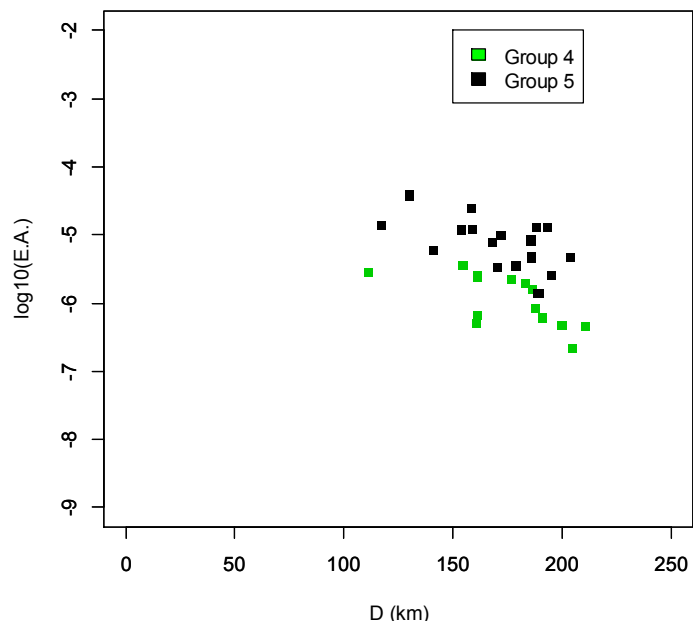
a) 0.1-1.0 Hz



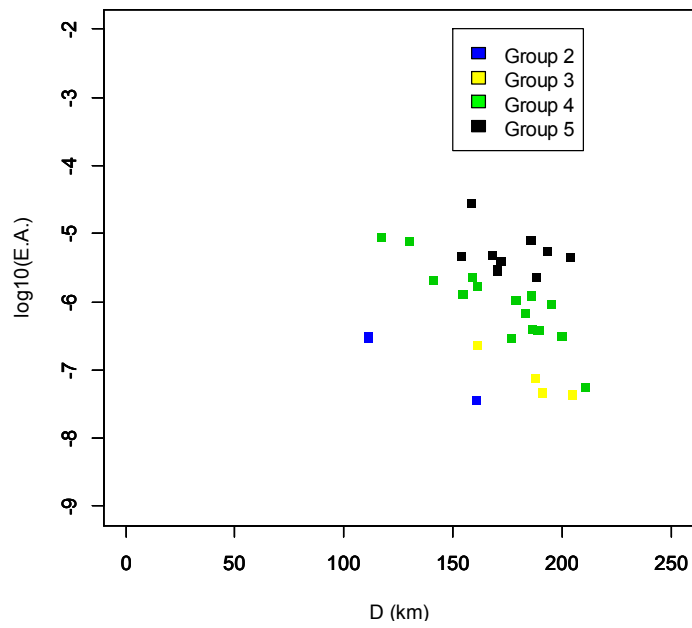
b) 1.0-2.0 Hz



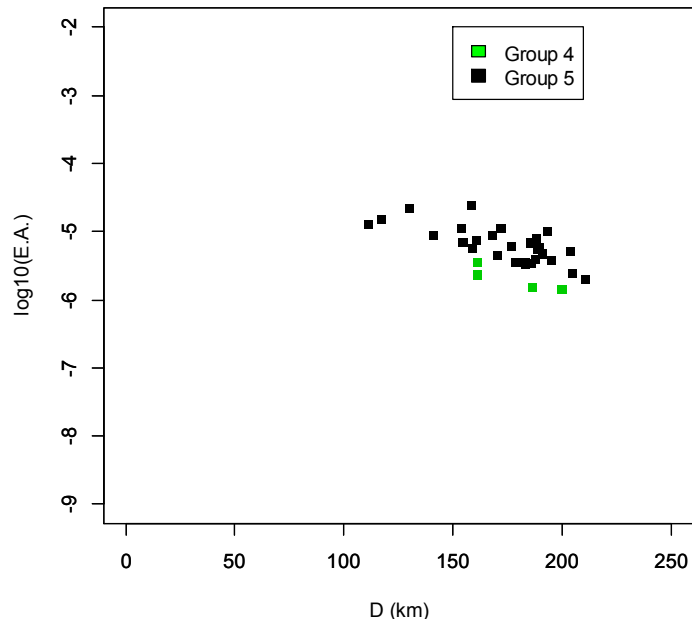
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

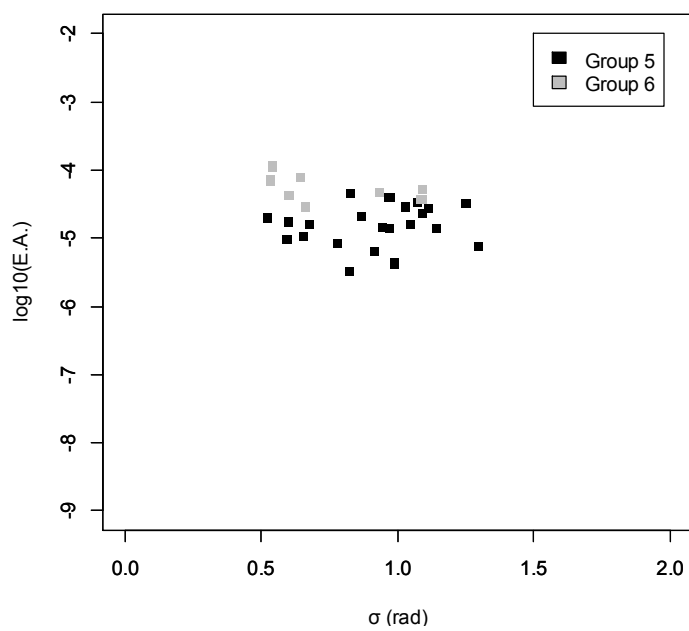


e) 5.0-10.0 Hz

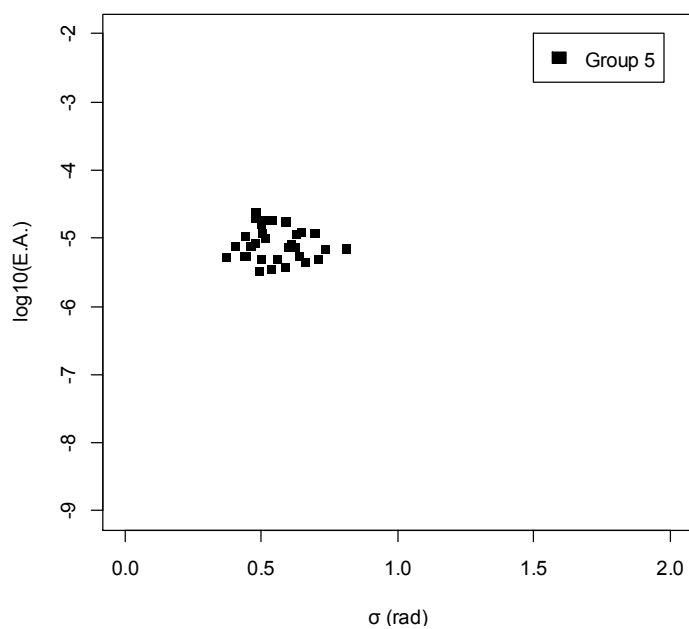


f) 0.1-10.0 Hz

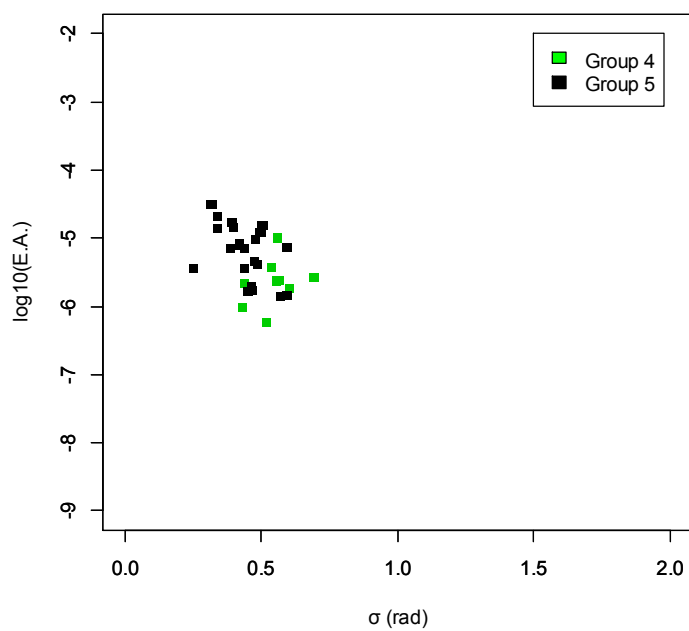
Fig.4.20: relations between D and $E.A.$ for 2003 Tokachi oki earthquake



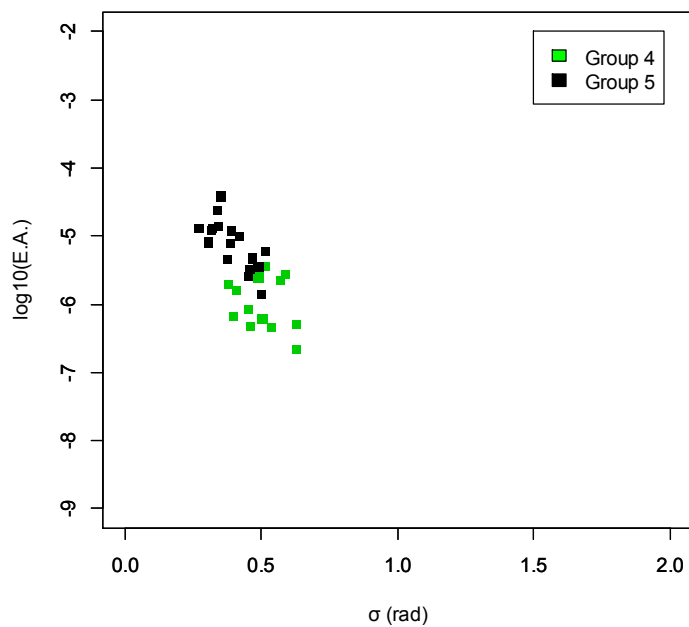
a) 0.1-1.0 Hz



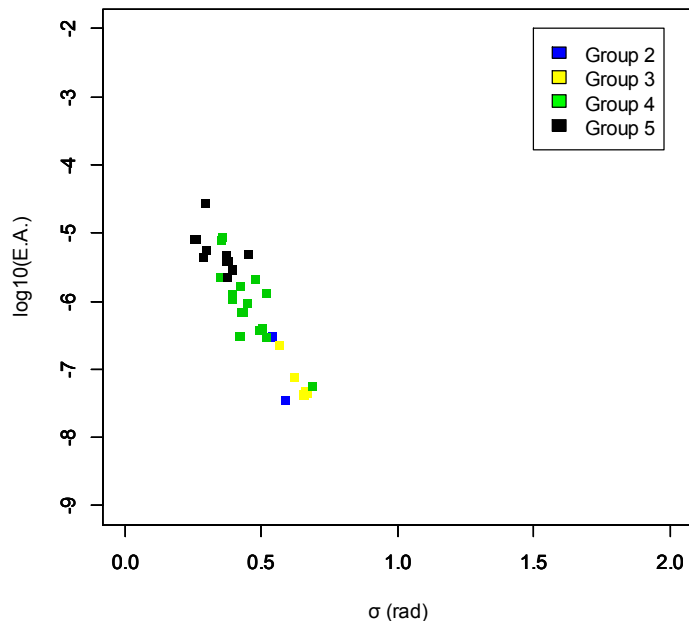
b) 1.0-2.0 Hz



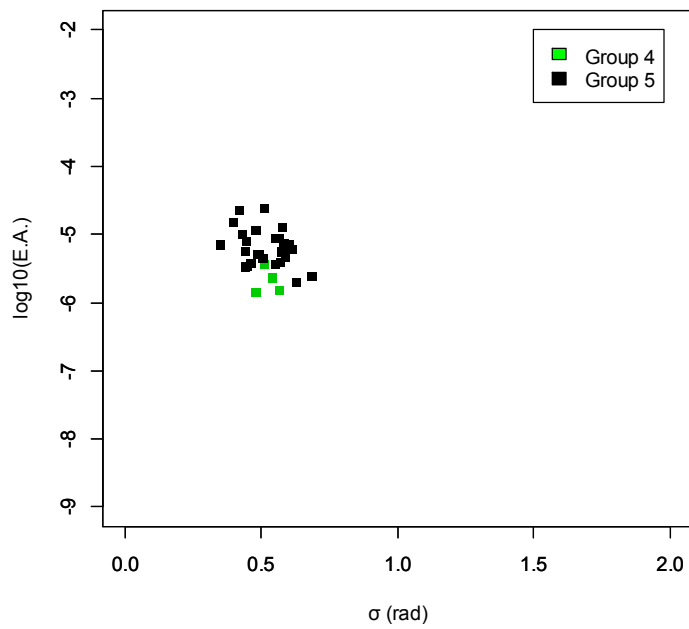
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

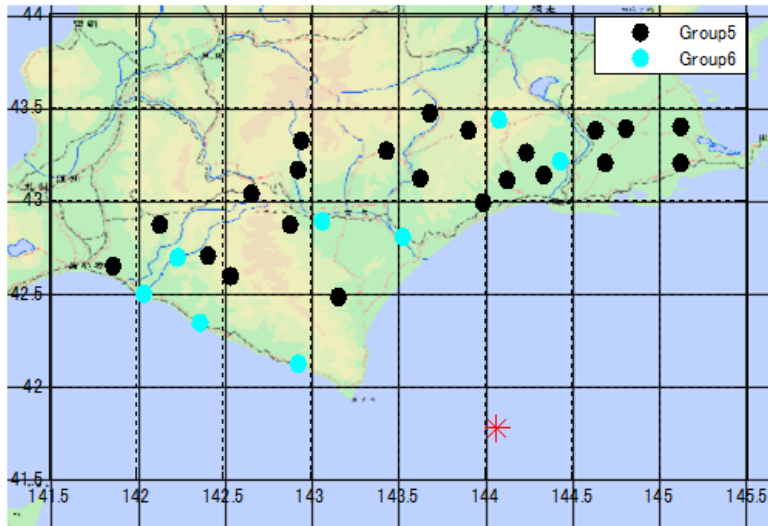


e) 5.0-10.0 Hz

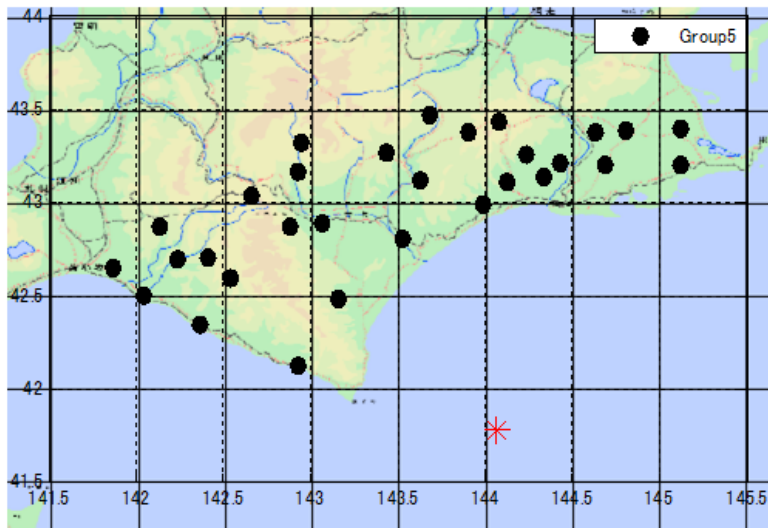


f) 0.1-10.0 Hz

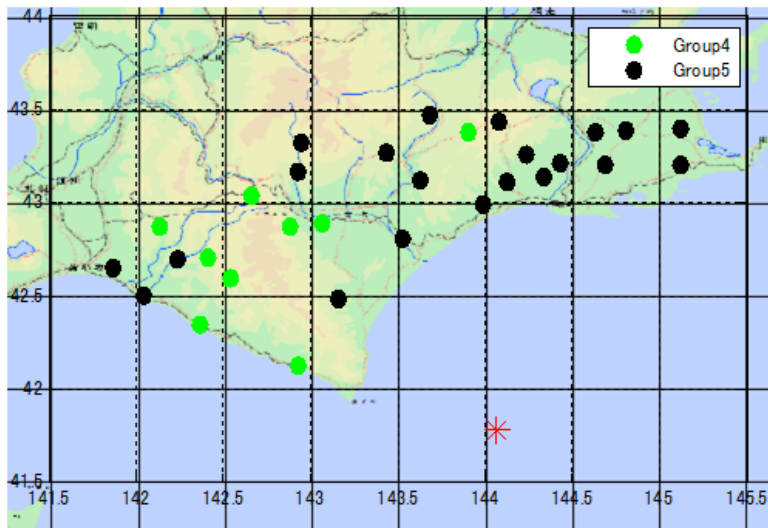
Fig.4.21: relations between σ and $E.A.$ for 2003 Tokachi oki earthquake



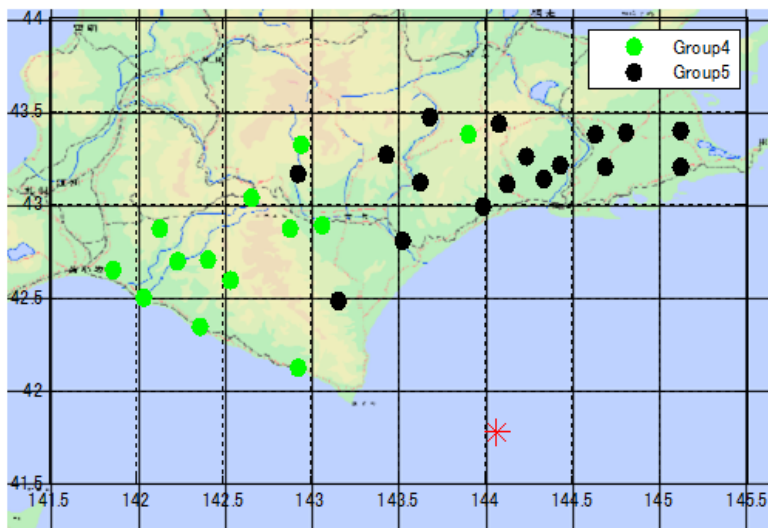
a) 0.1 – 1.0 Hz



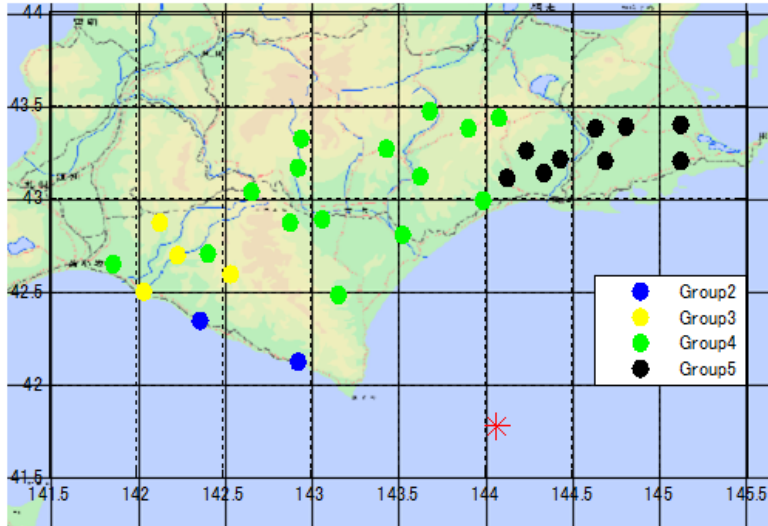
b) 1.0 – 2.0 Hz



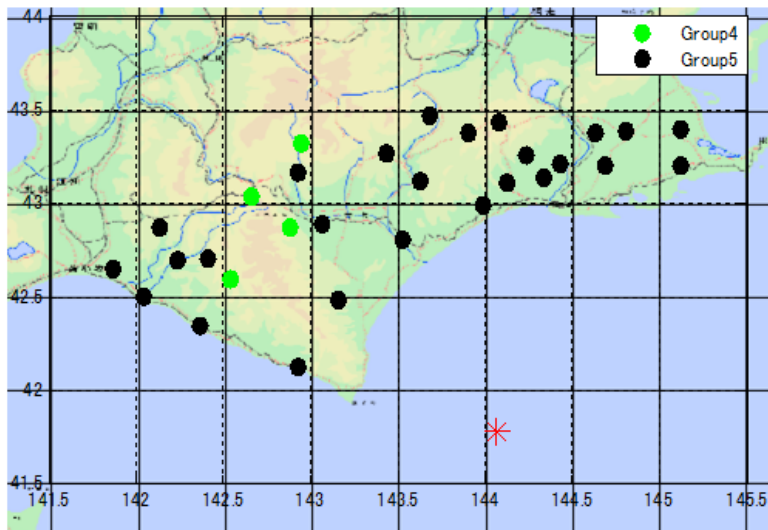
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



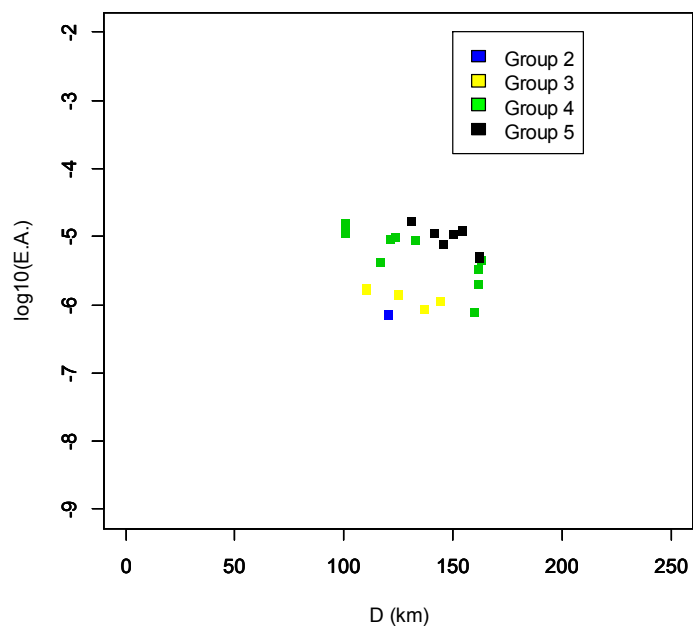
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.22: locations of sites in each Group for 2003 Tokachi oki earthquake

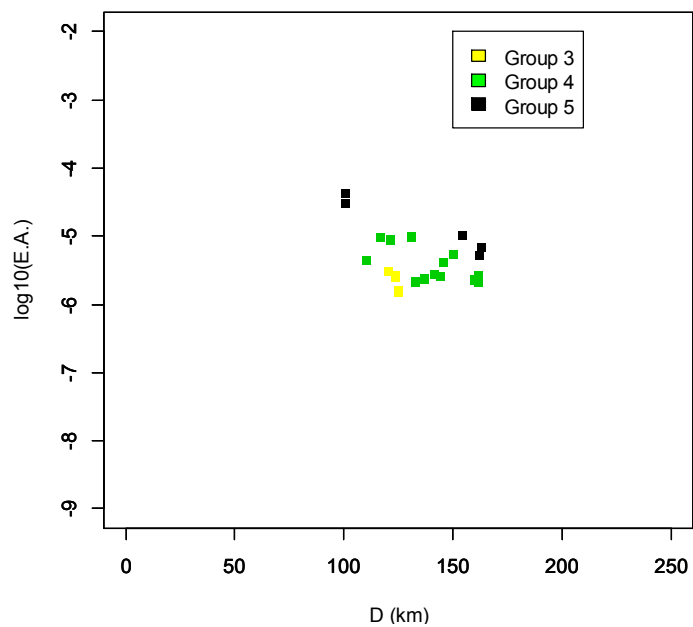
4.3.8 2005 年宮城県沖地震における結果

2005 年宮城県沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.23, Fig.4.24 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.25 に示す. Fig.4.23 と Fig.4.24 から次のような傾向を見て取れる.

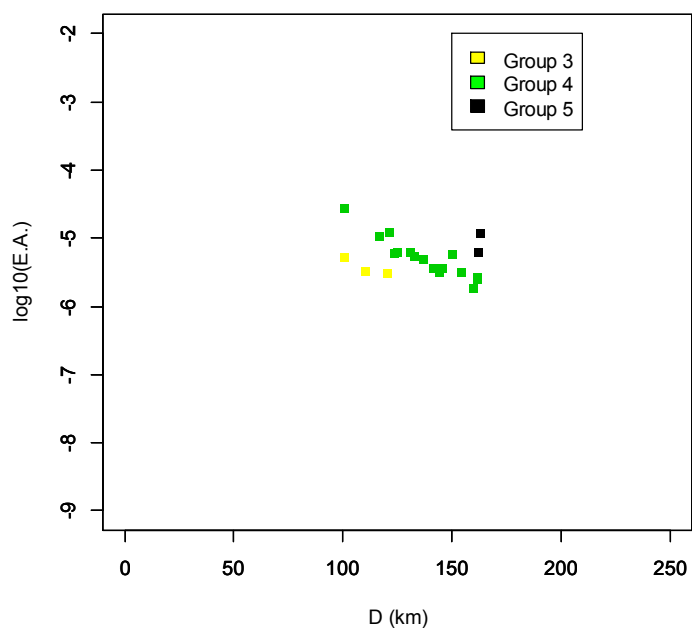
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係はほぼフラットで, ばらつきも大きい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



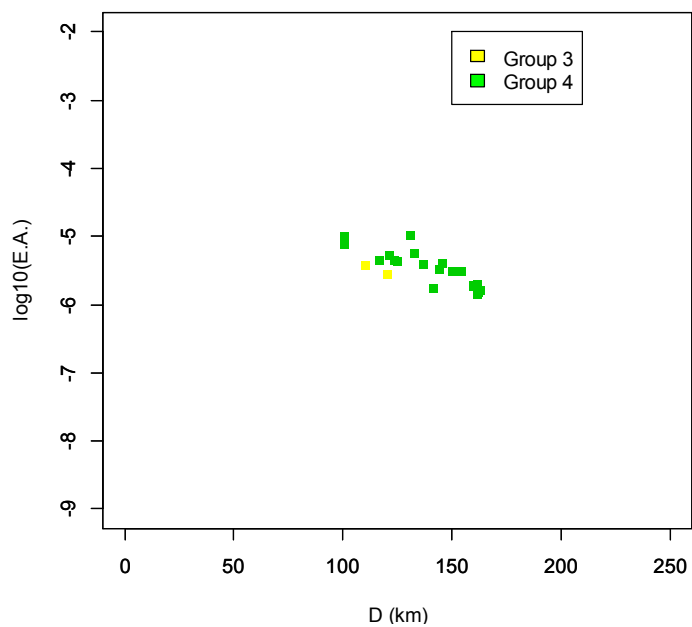
a) 0.1-1.0 Hz



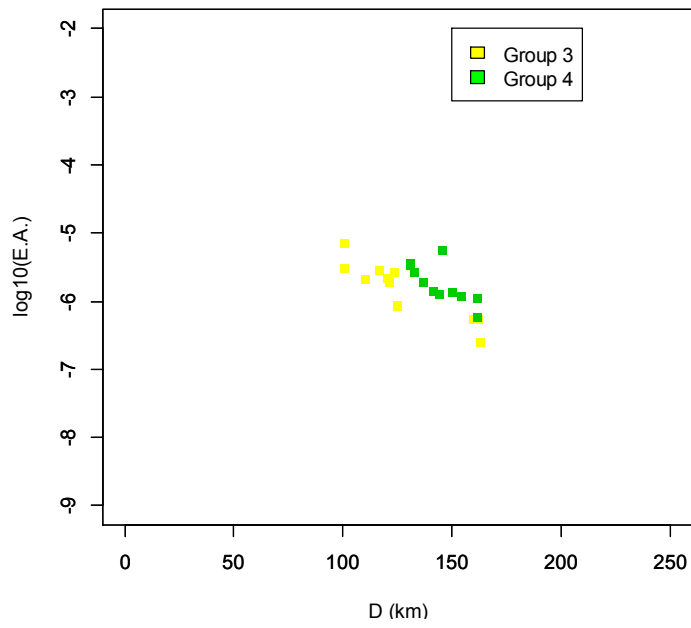
b) 1.0-2.0 Hz



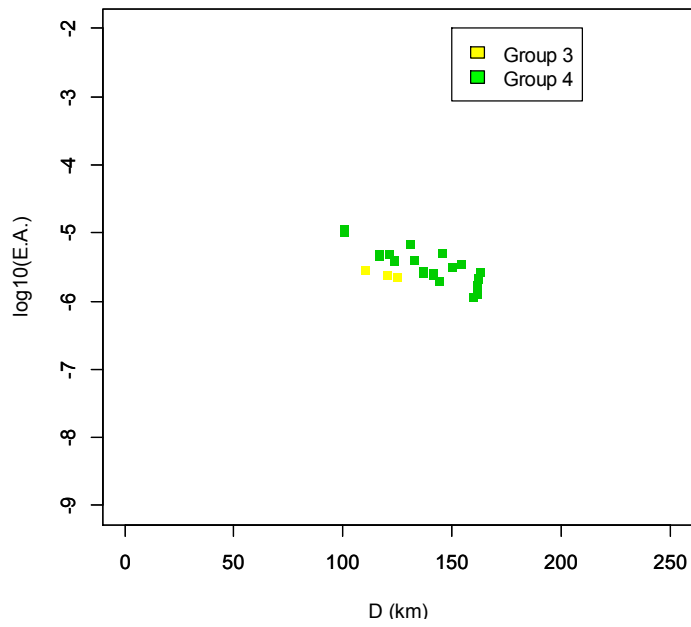
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

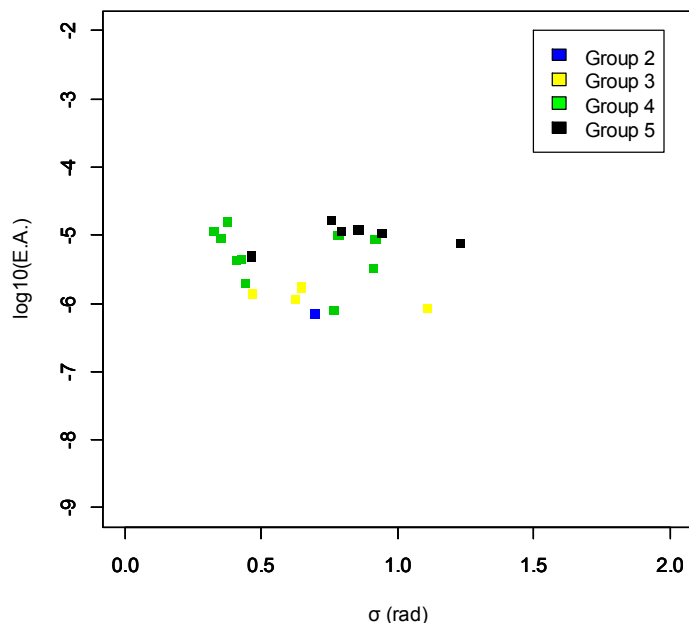


e) 5.0-10.0 Hz

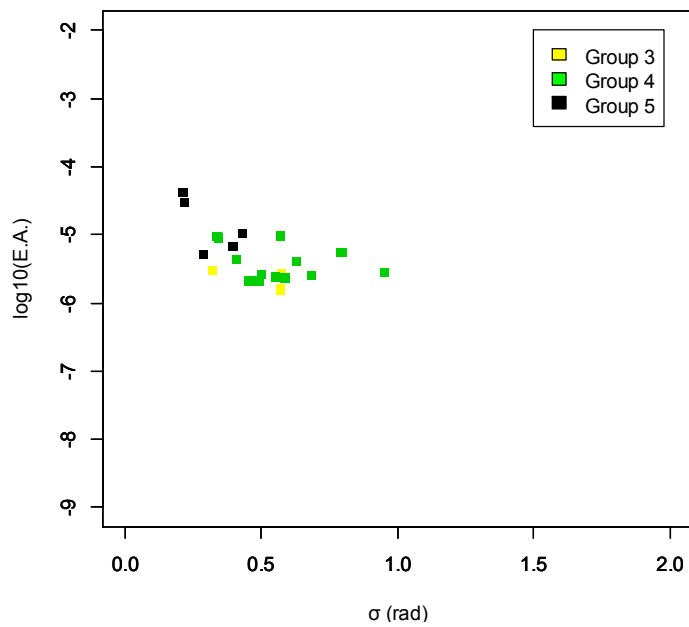


f) 0.1-10.0 Hz

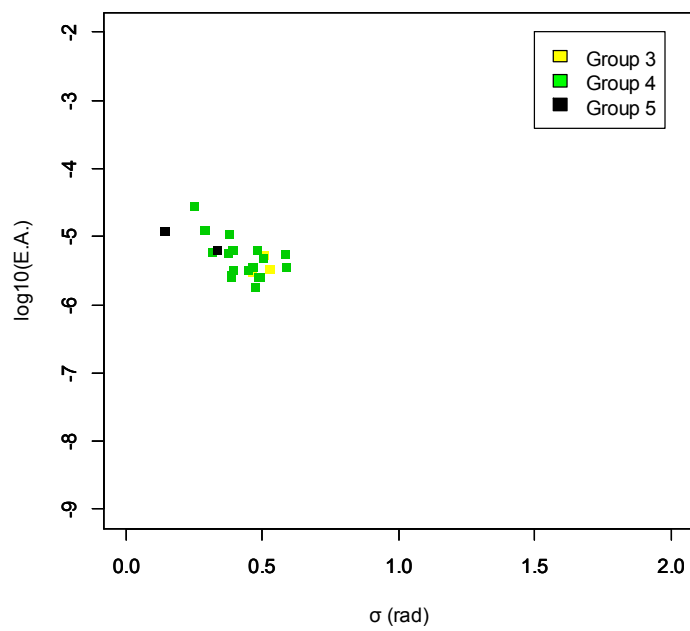
Fig 4.23: relations between D and $E.A.$ for 2005 Miyagiken oki earthquake



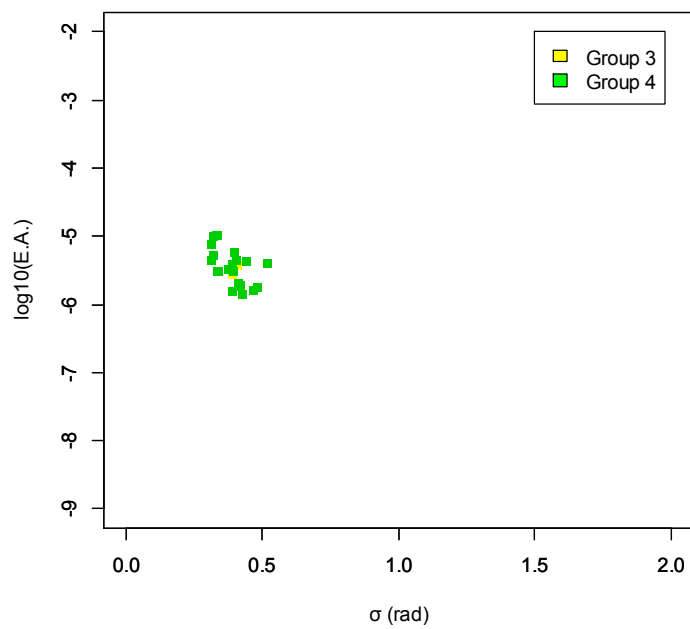
a) 0.1-1.0 Hz



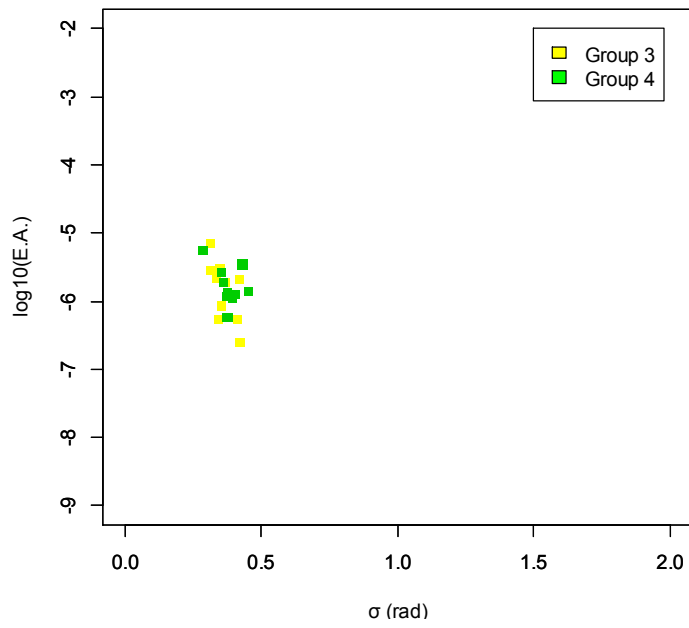
b) 1.0-2.0 Hz



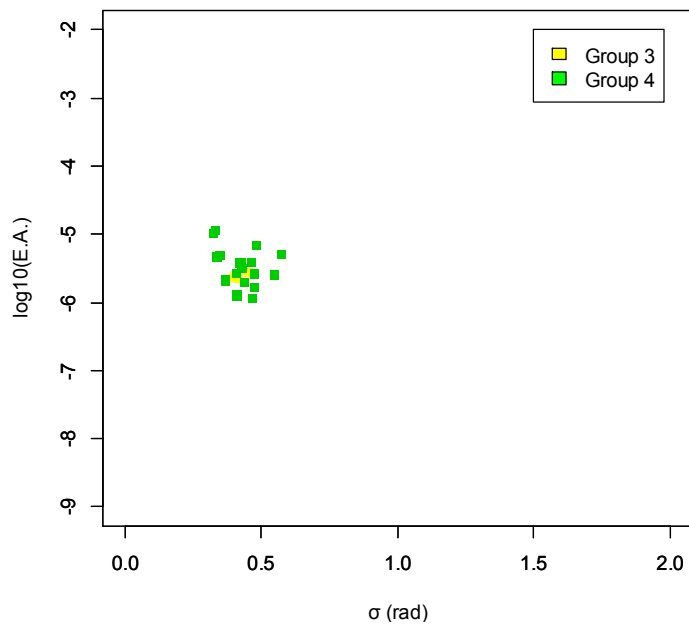
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

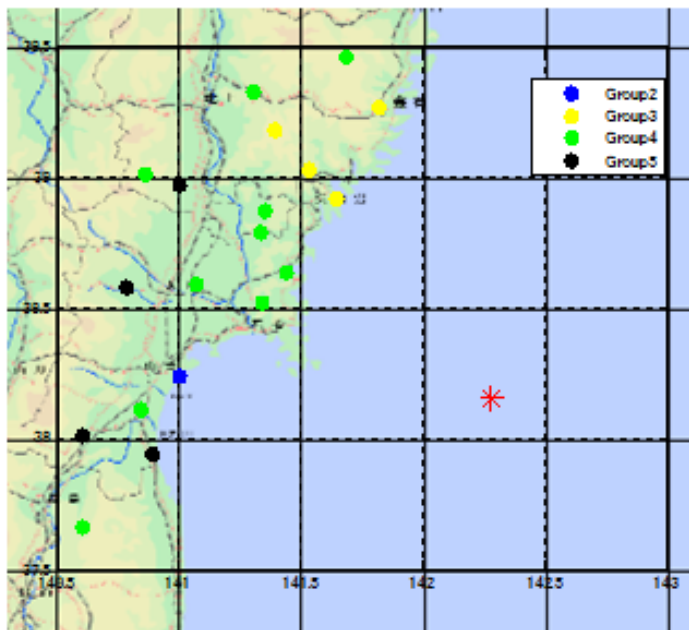


e) 5.0-10.0 Hz

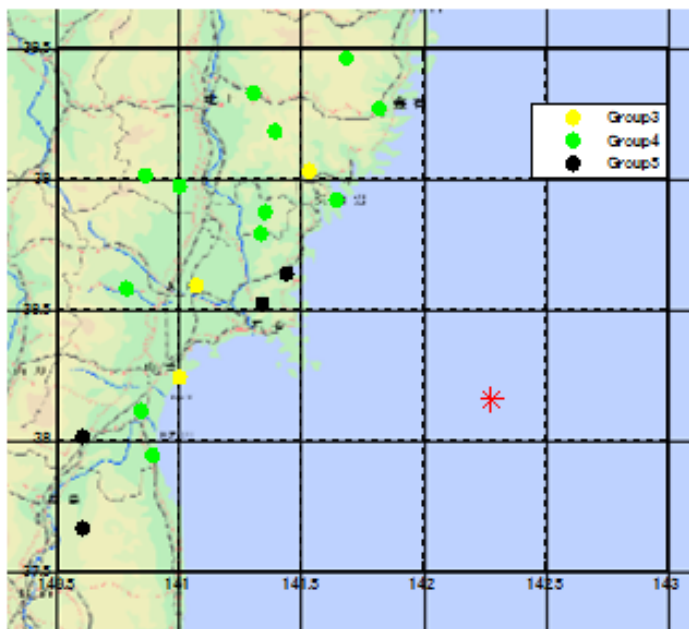


f) 0.1-10.0 Hz

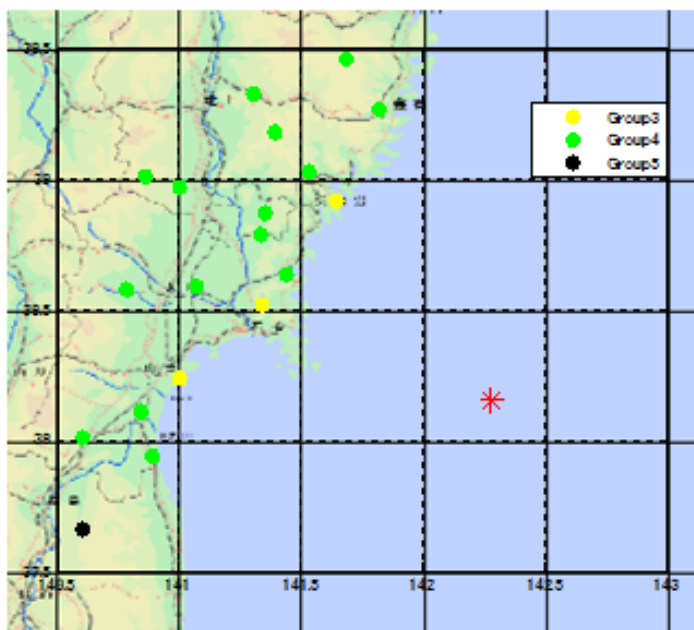
Fig.4.24: relations between σ and $E.A.$ for 2005 Miyagiken oki earthquake



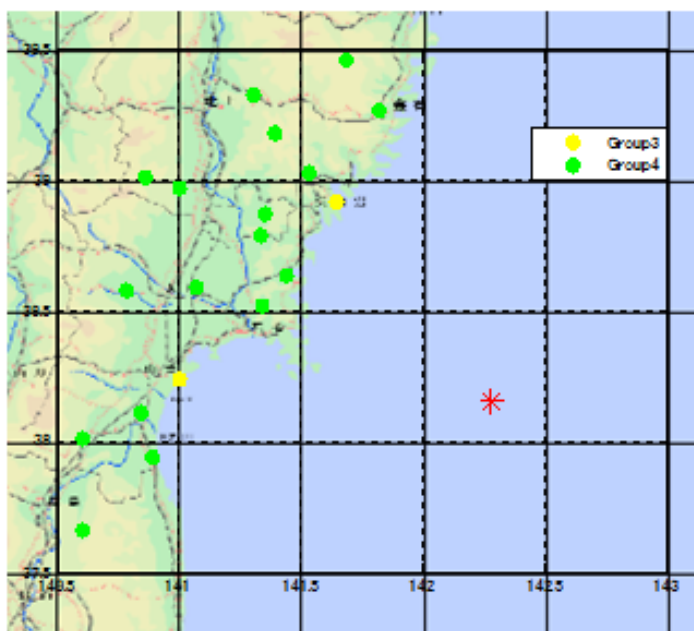
a) 0.1 – 1.0 Hz



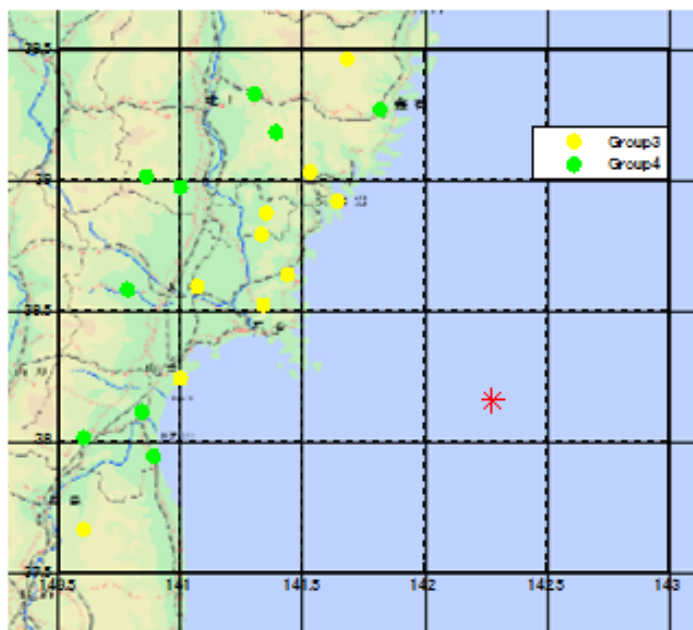
b) 1.0 – 2.0 Hz



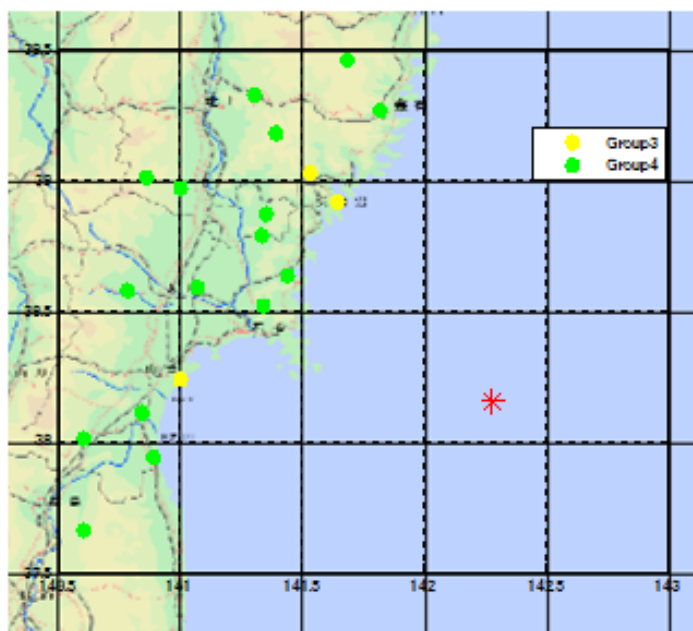
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



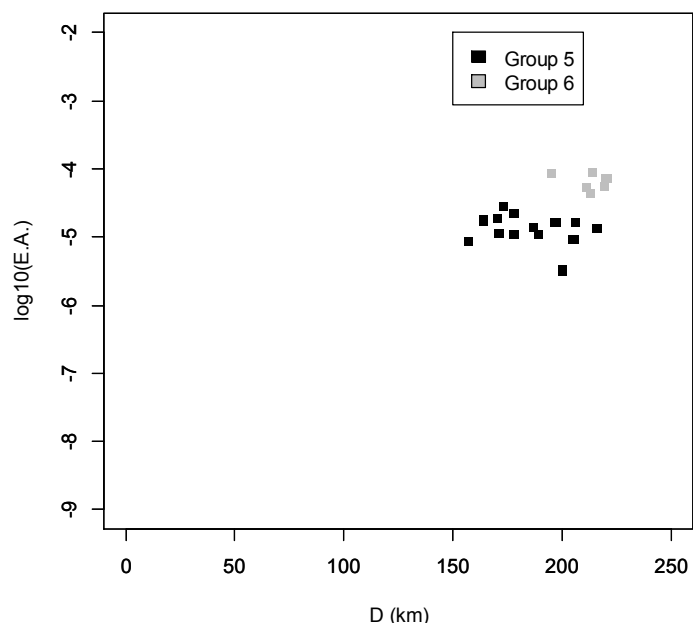
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.25: locations of sites in each Group for 2005 Miyagiken oki earthquake

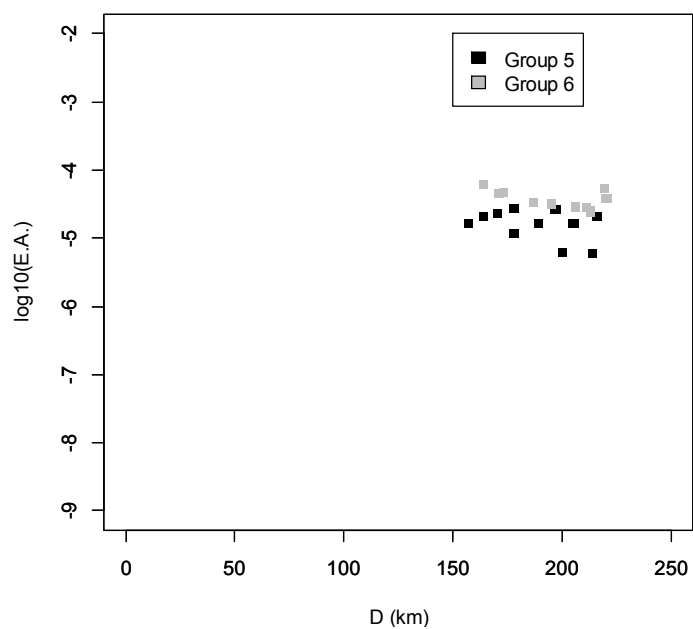
4.3.9 2011 年三陸沖地震における結果

2011 年三陸沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.26, Fig.4.27 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.28 に示す. Fig.4.26 と Fig.4.27 から次のような傾向を見て取れる.

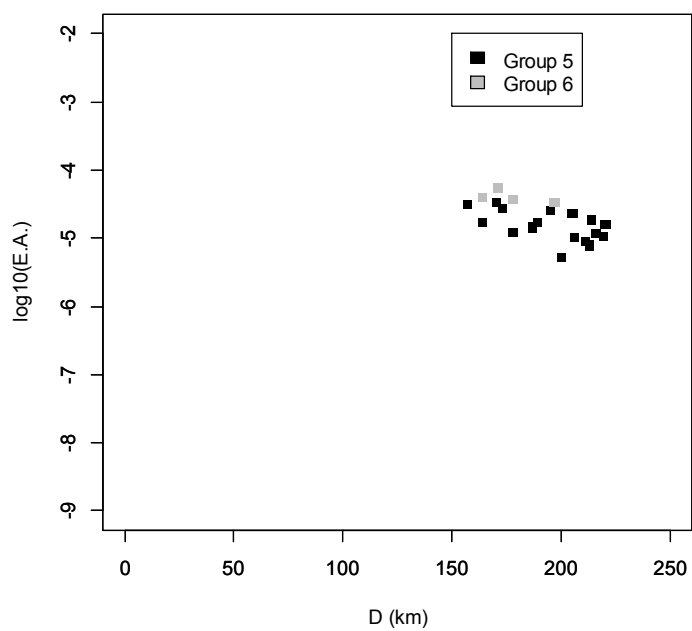
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係で Group 間の差が大きい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



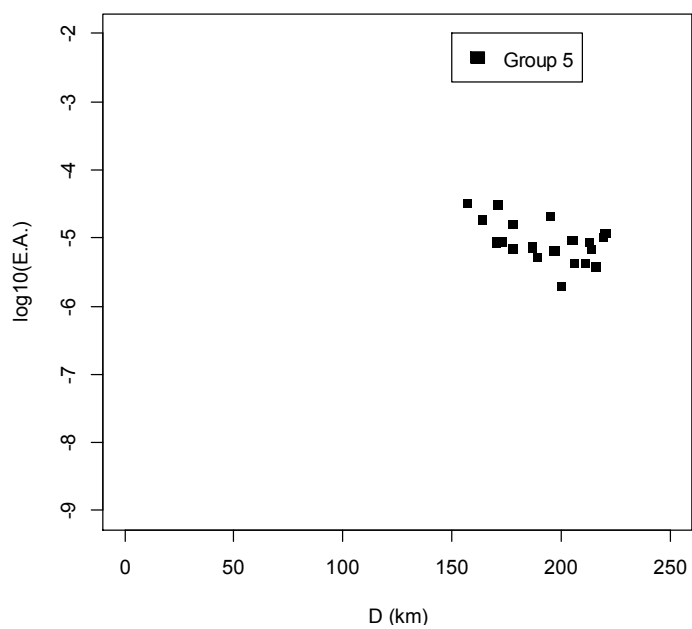
a) 0.1-1.0 Hz



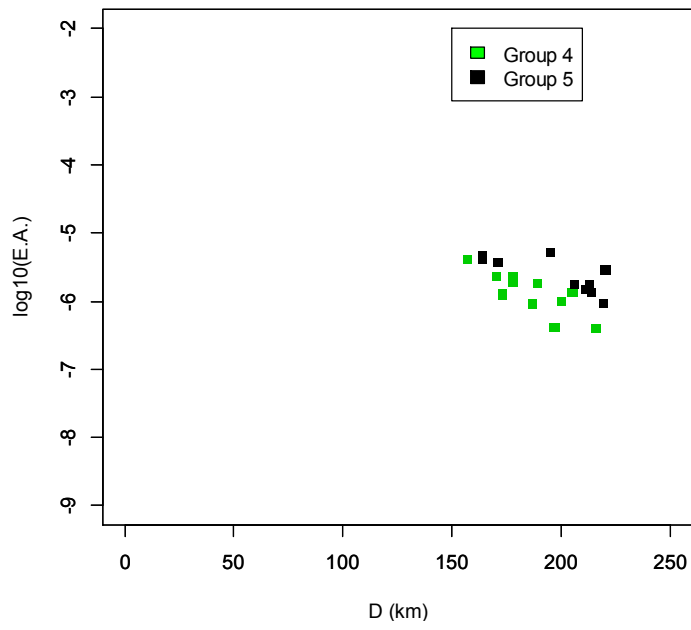
b) 1.0-2.0 Hz



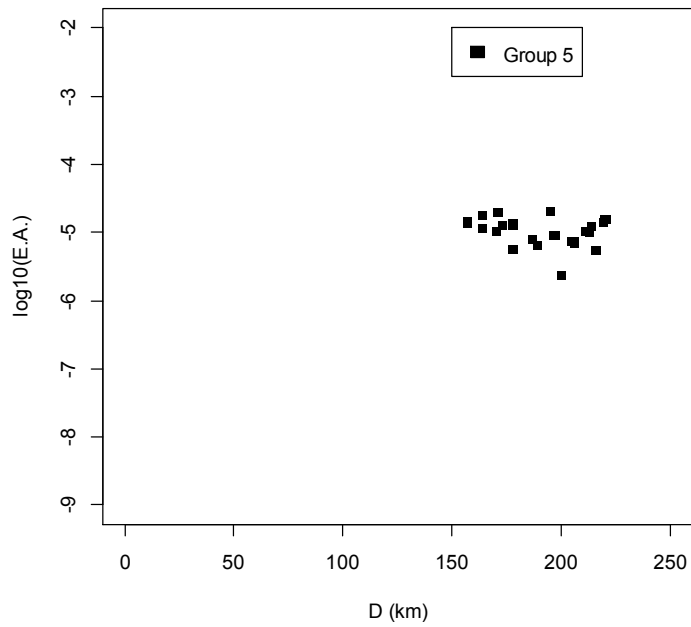
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

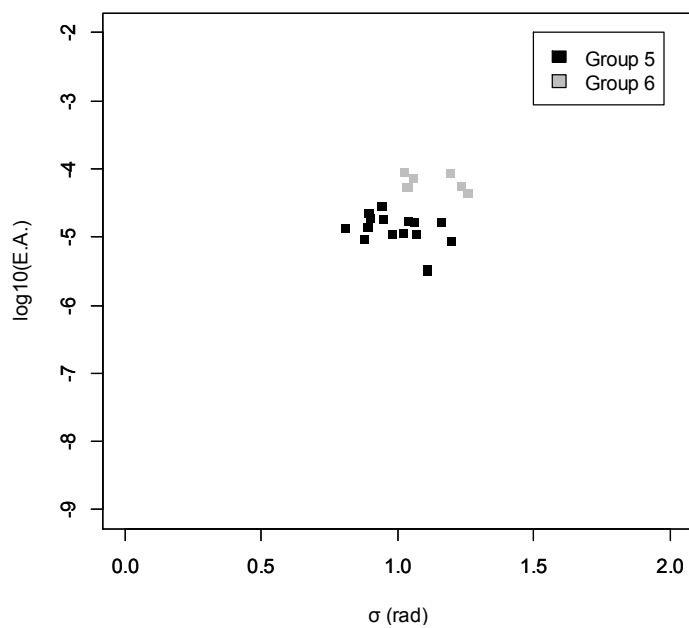


e) 5.0-10.0 Hz

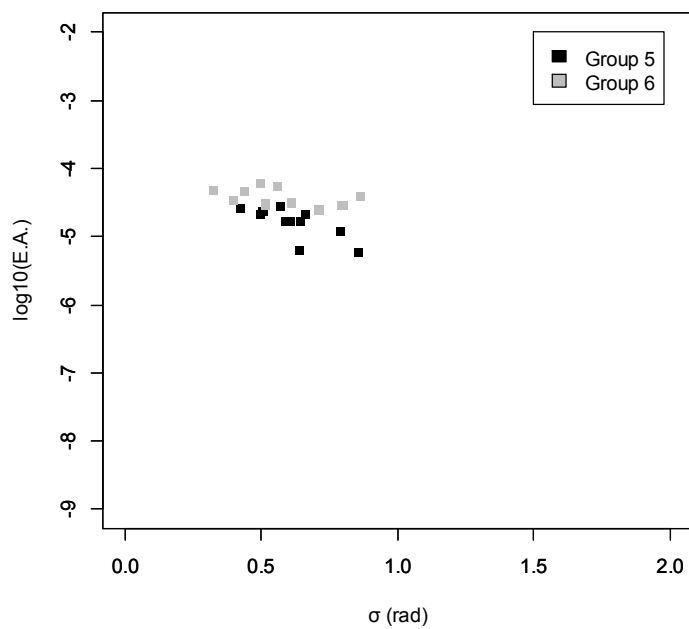


f) 0.1-10.0 Hz

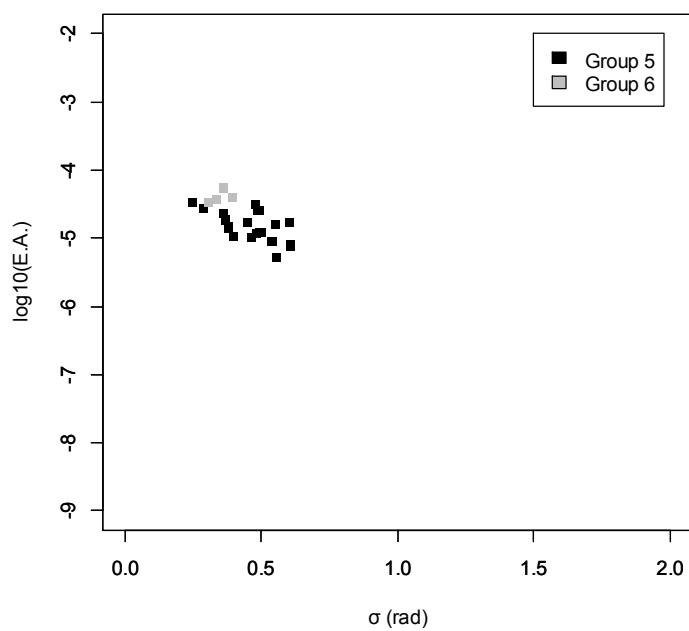
Fig.4.26: relations between D and $E.A.$ for 2011 Sanriku oki earthquake



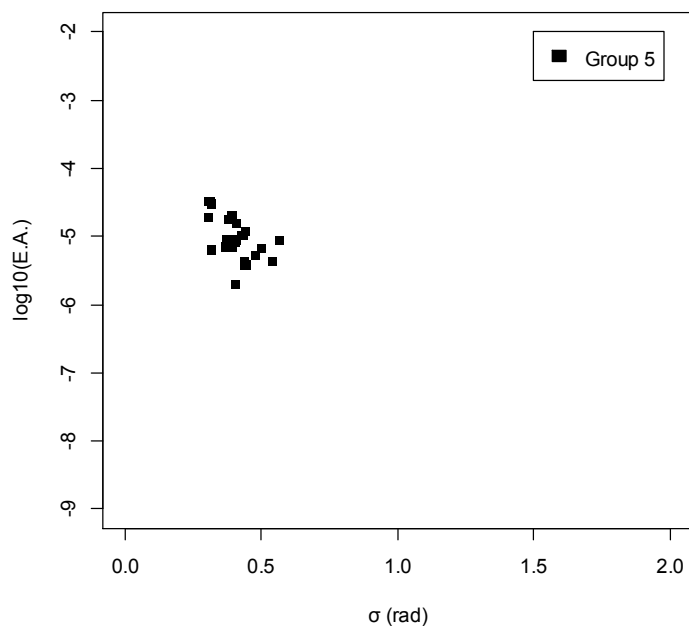
a) 0.1-1.0 Hz



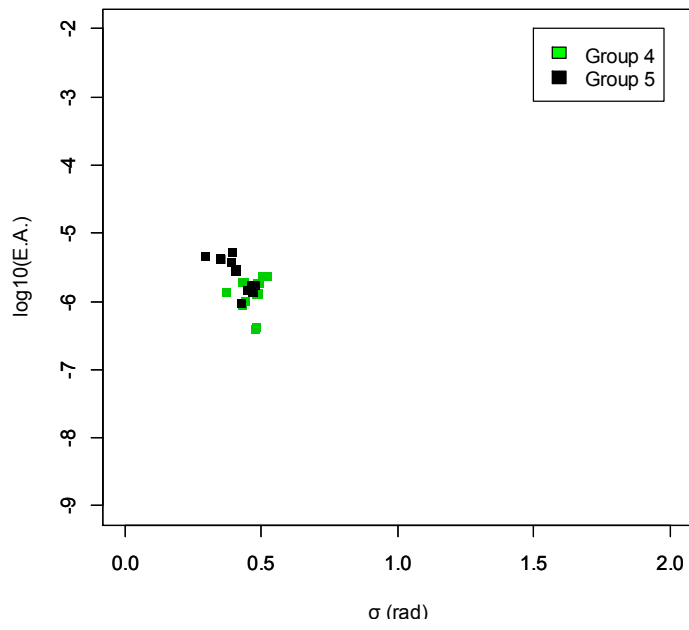
b) 1.0-2.0 Hz



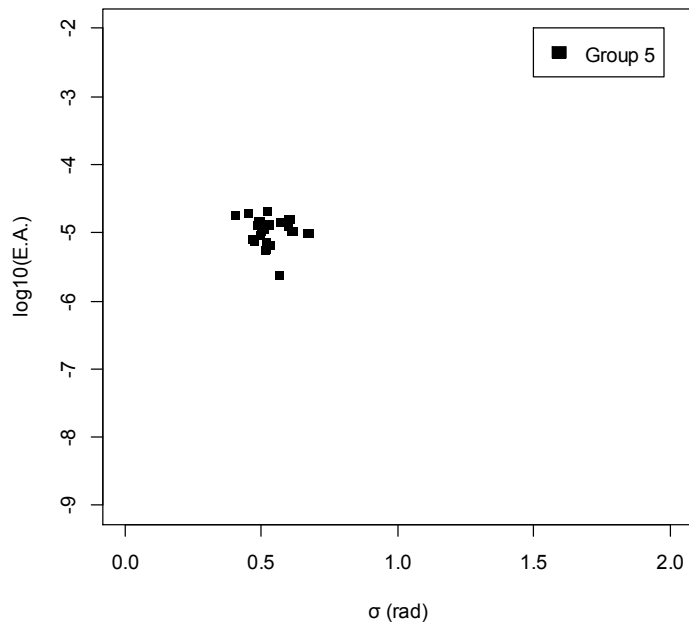
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

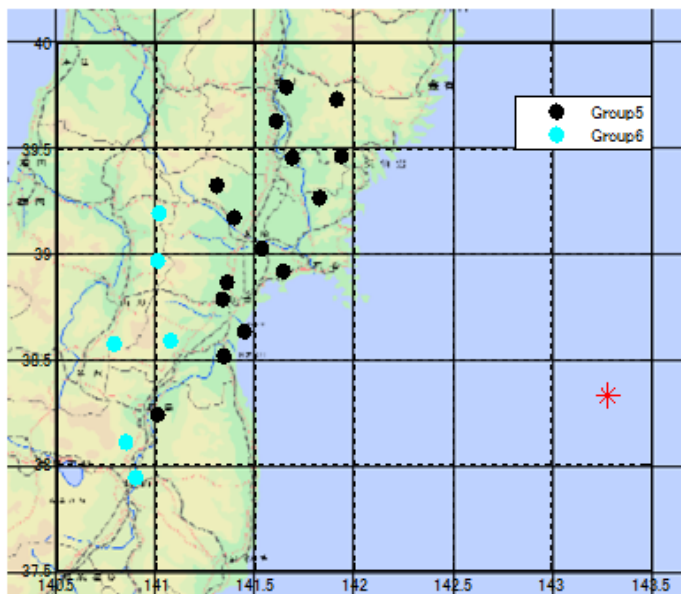


e) 5.0-10.0 Hz

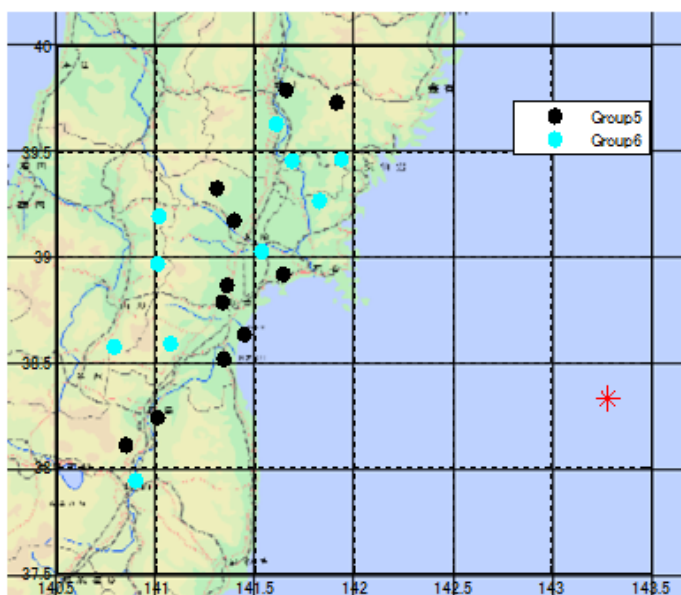


f) 0.1-10.0 Hz

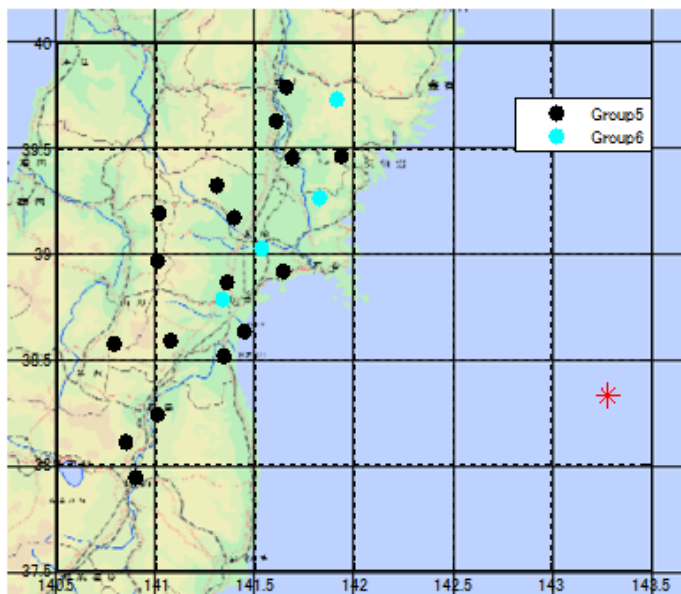
Fig.4.27: relations between σ and $E.A.$ for 2011 Sanriku oki earthquake



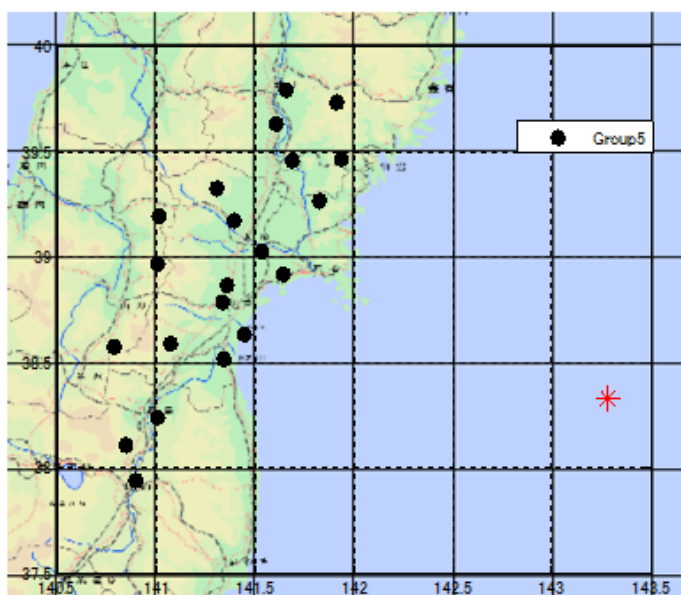
a) 0.1 – 1.0 Hz



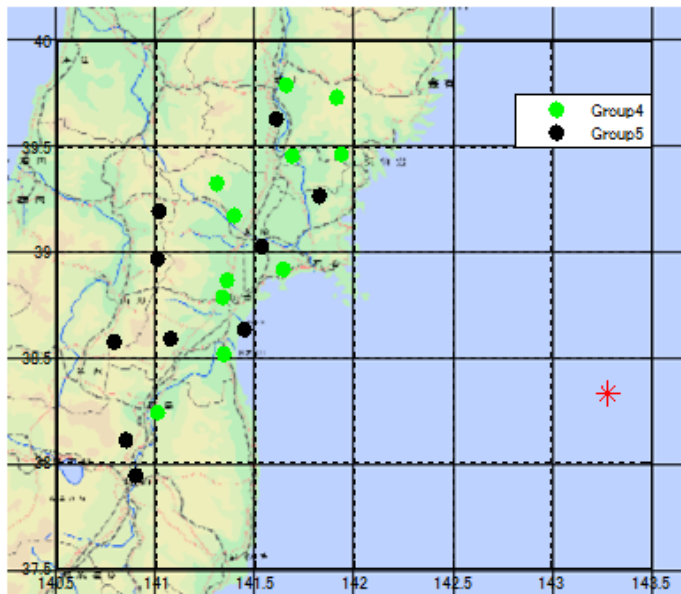
b) 1.0 – 2.0 Hz



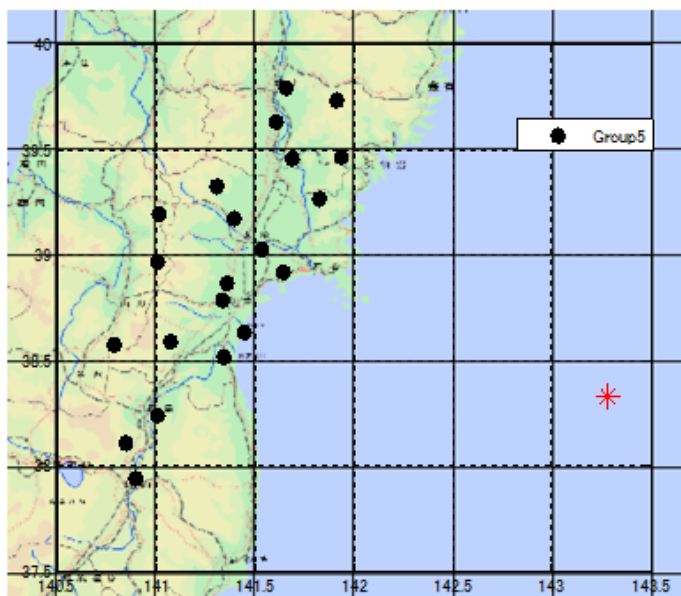
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



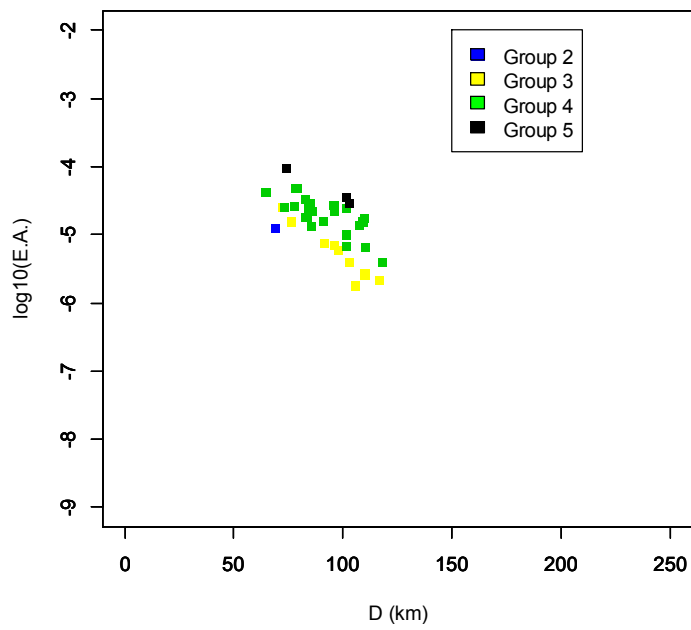
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.28: locations of sites in each Group for 2011 Sanriku oki earthquake

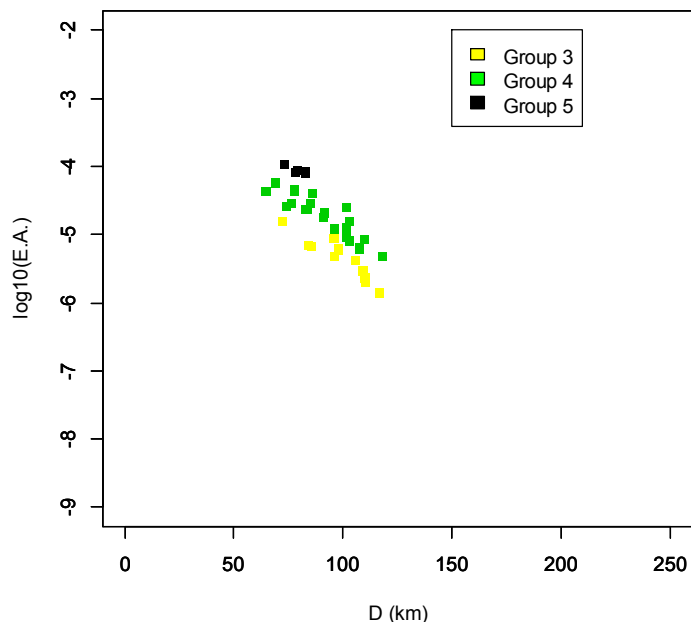
4.3.10 2001 年芸予地震における結果

2001 年芸予地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.29, Fig.4.30 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.31 に示す. Fig.4.29 と Fig.4.30 から次のような傾向を見て取れる.

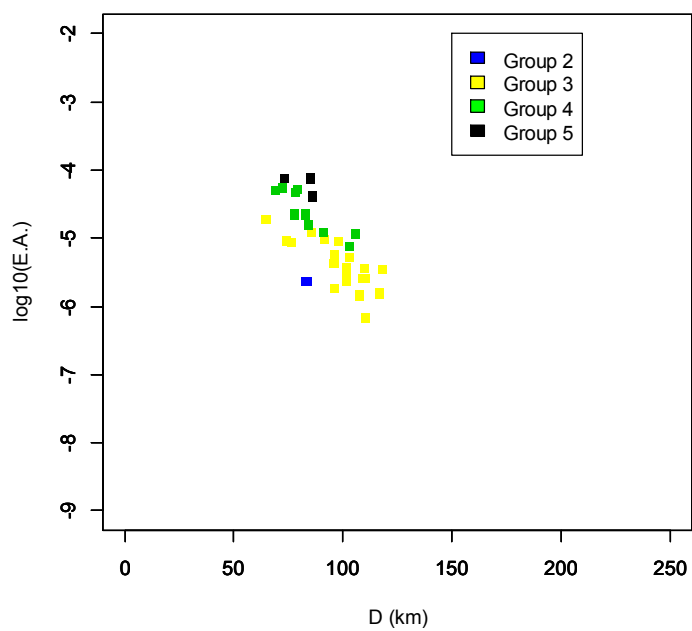
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) どの周波数帯域であっても Group 間の σ と $E.A.$ の関係の差は小さい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



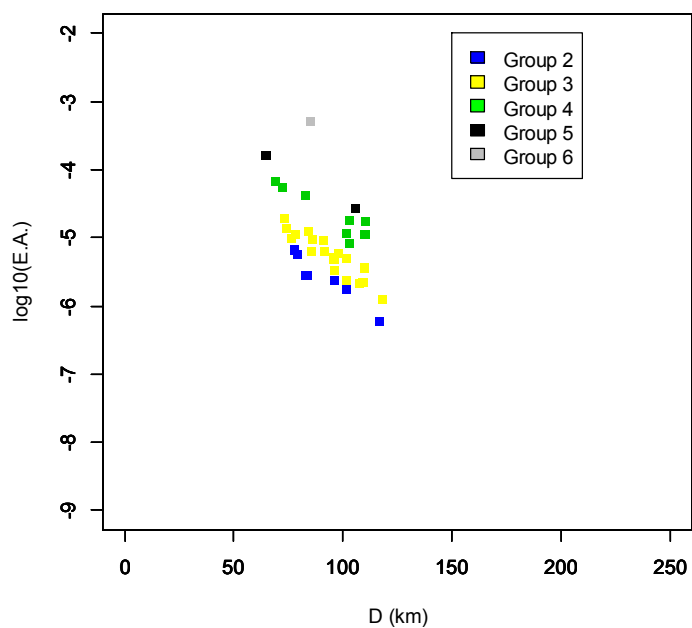
a) 0.1-1.0 Hz



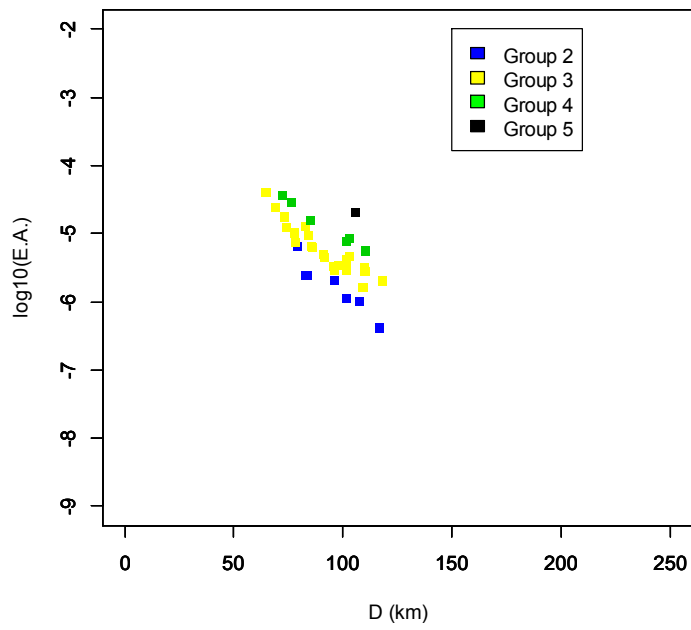
b) 1.0-2.0 Hz



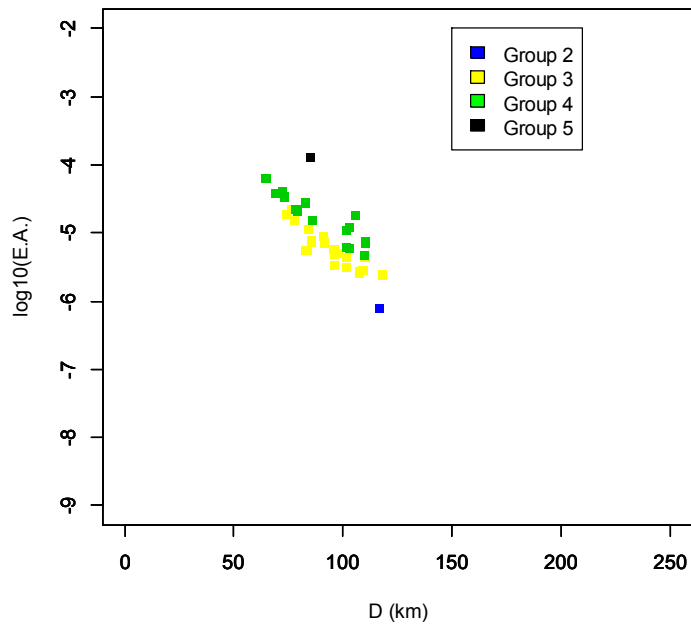
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

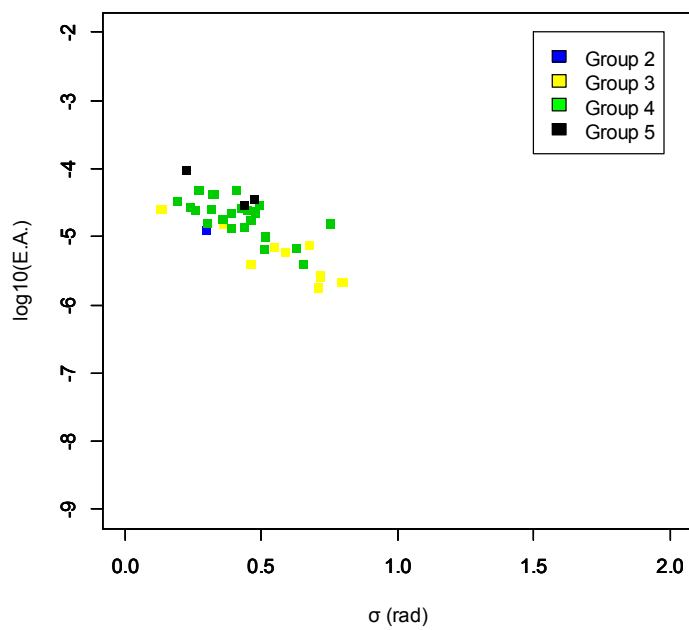


e) 5.0-10.0 Hz

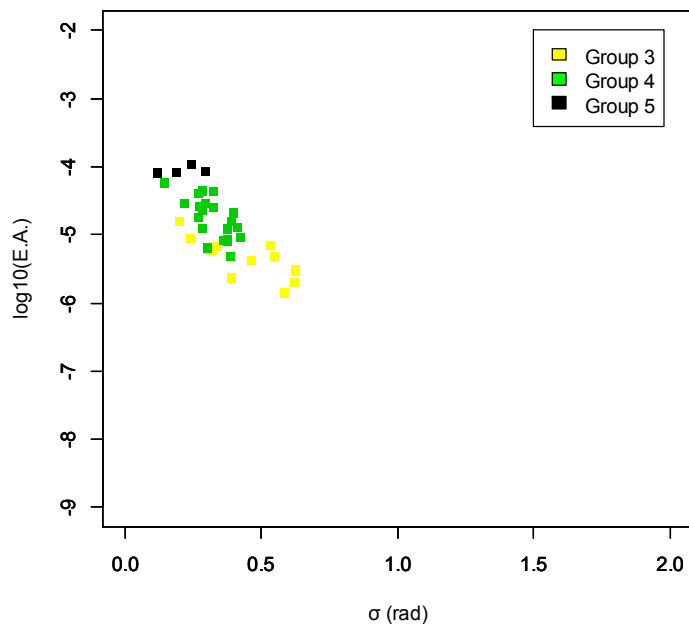


f) 0.1-10.0 Hz

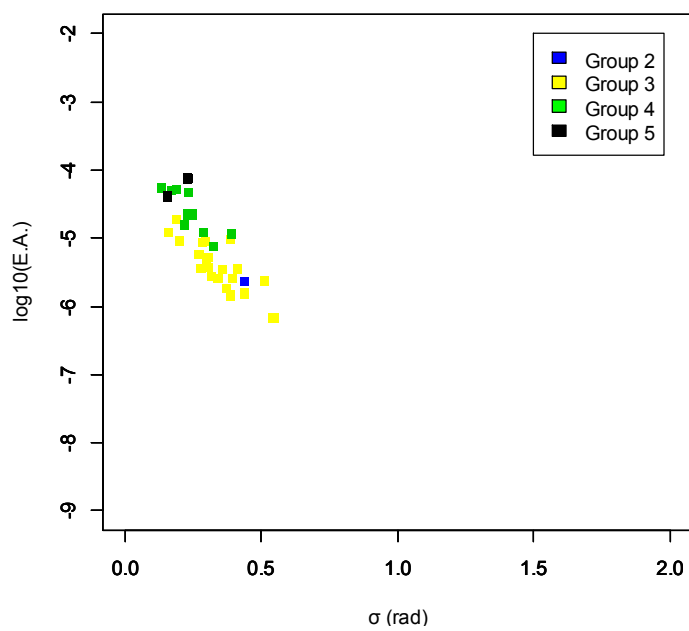
Fig.4.29: relations between D and $E.A.$ for 2001 Geiyo earthquake



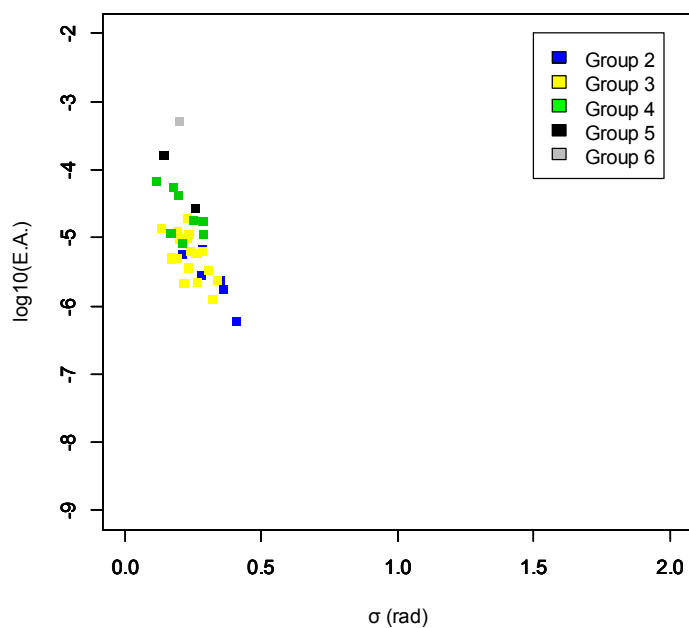
a) 0.1-1.0 Hz



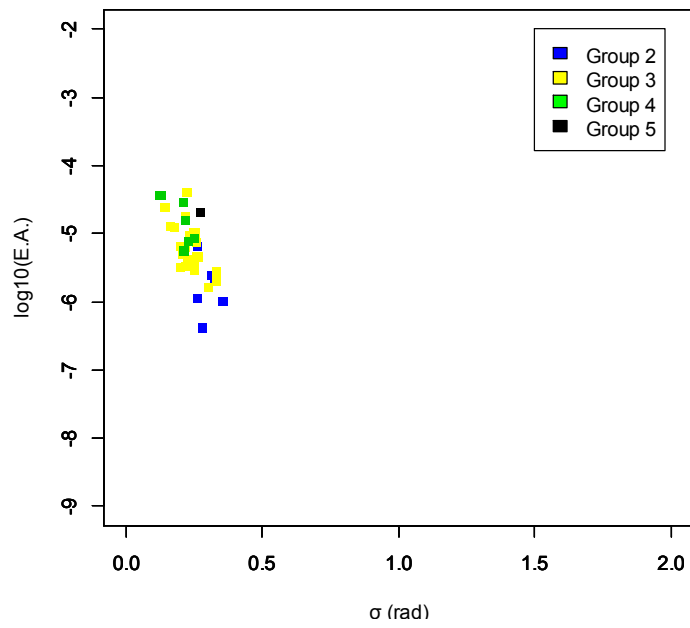
b) 1.0-2.0 Hz



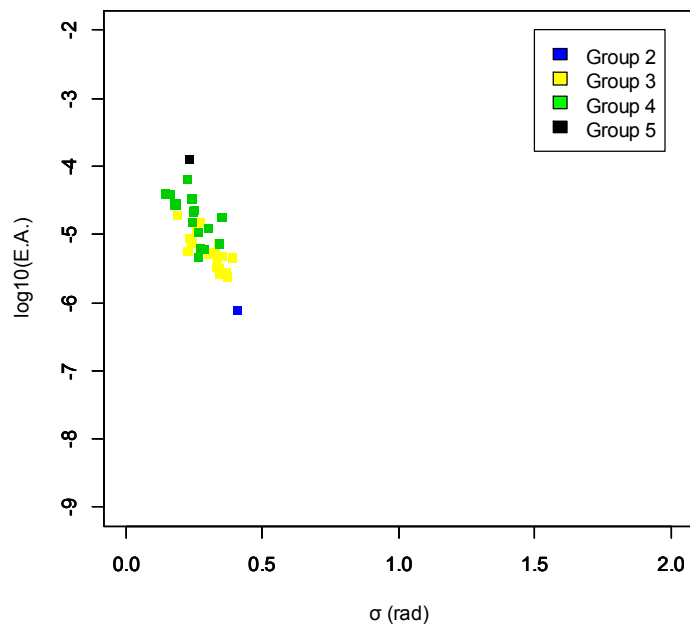
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

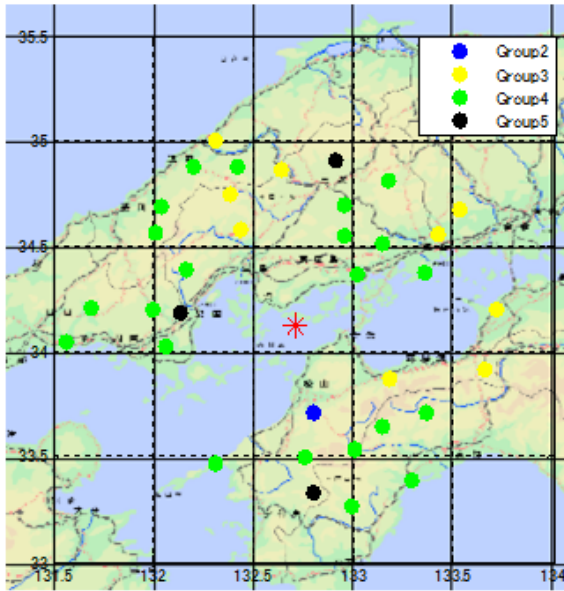


e) 5.0-10.0 Hz

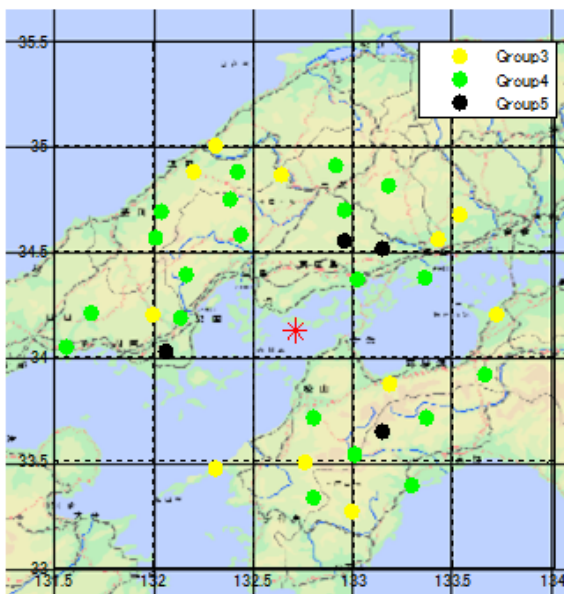


f) 0.1-10.0 Hz

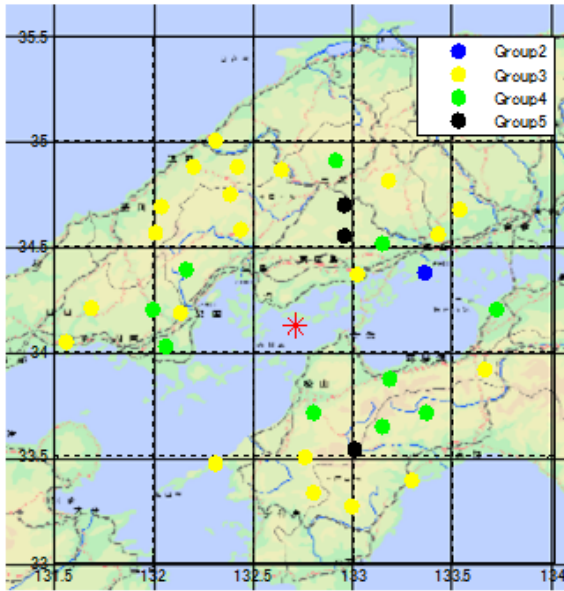
Fig.4.30: relations between σ and $E.A.$ for 2001 Geiyo earthquake



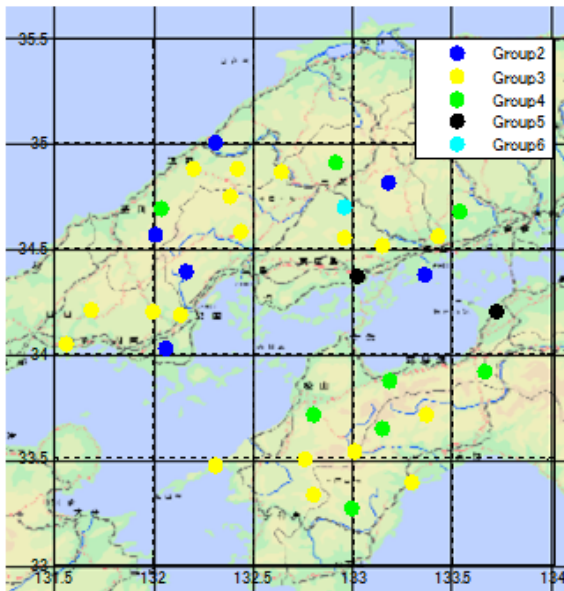
a) 0.1 – 1.0 Hz



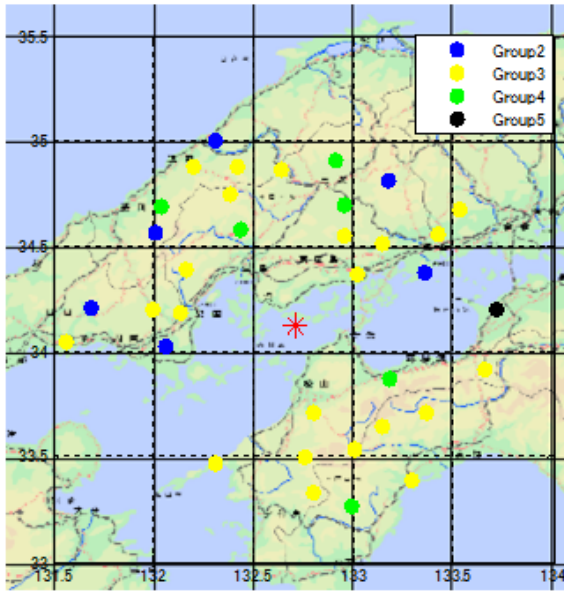
b) 1.0 – 2.0 Hz



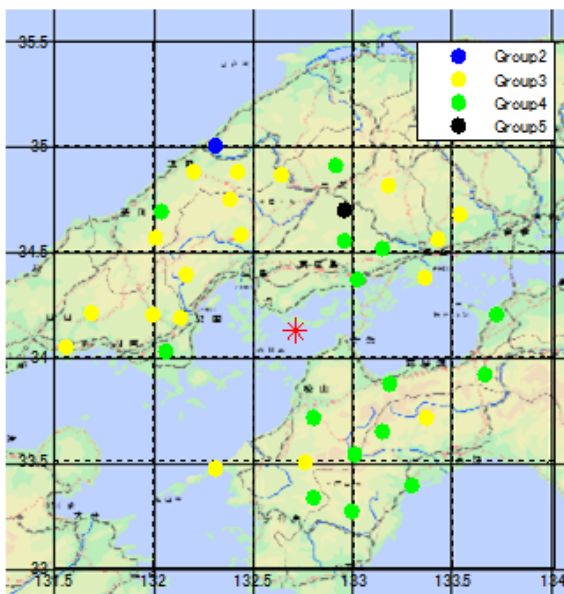
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



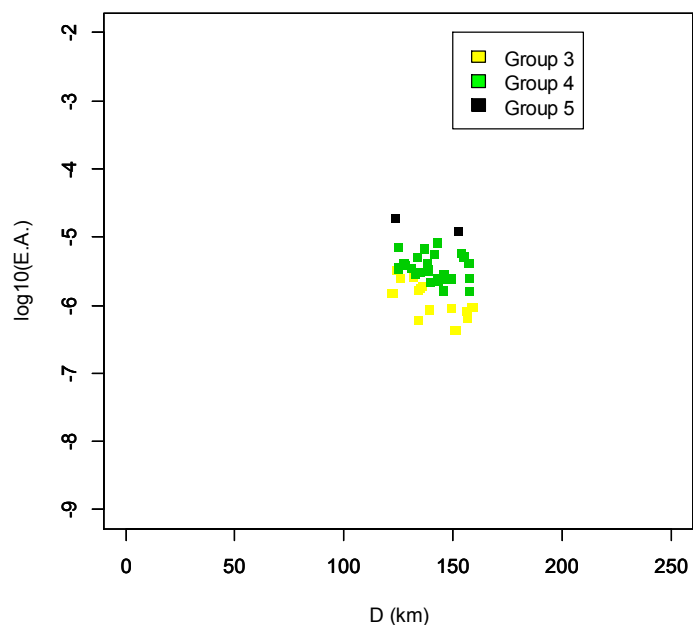
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.31: locations of sites in each Group for 2001 Geiyo earthquake

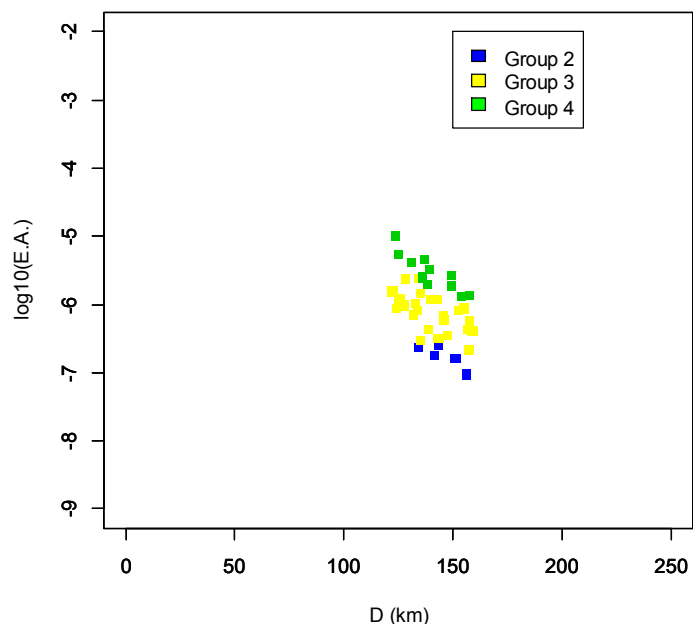
4.3.11 2001 年岩手県内陸南部地震における結果

2001 年岩手県内陸南部地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.32, Fig.4.33 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.34 に示す. Fig.4.32 と Fig.4.33 から次のような傾向を見て取れる.

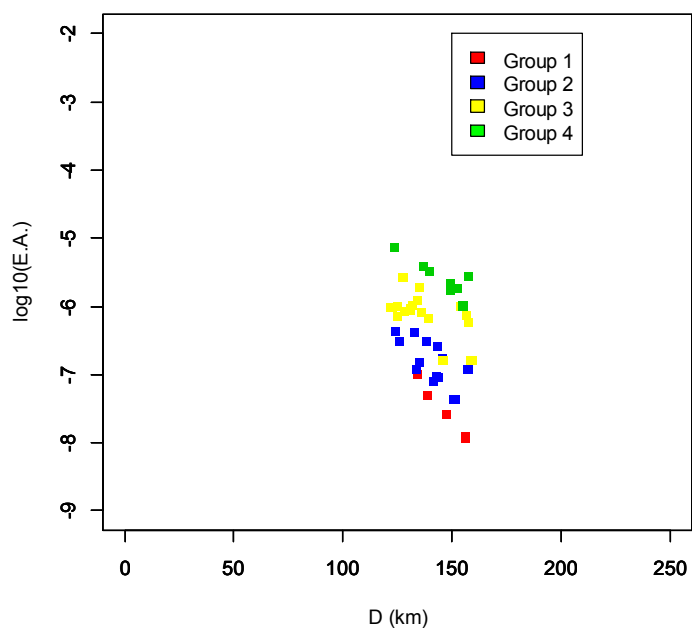
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) σ と $E.A.$ の関係ではどの周波数帯域を見ても, Group 間の差が大きい. 特に 5.0 – 10.0 Hz においても Group 間の差は明確に表れている
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



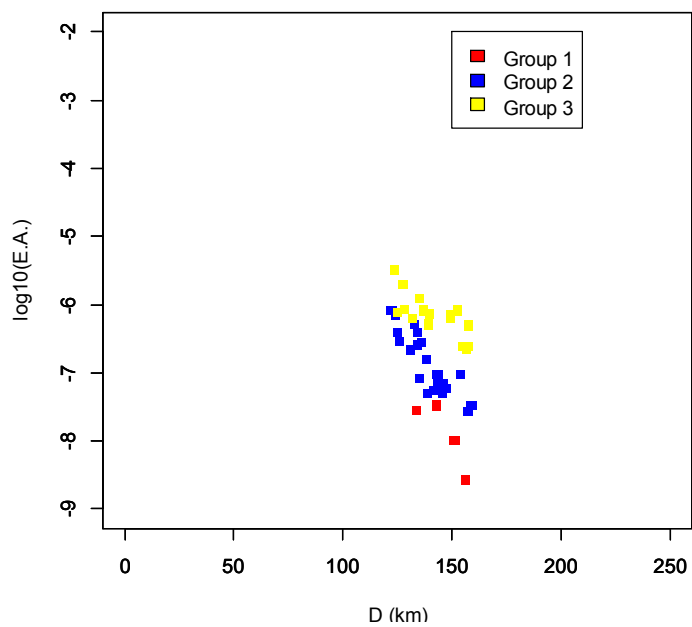
a) 0.1-1.0 Hz



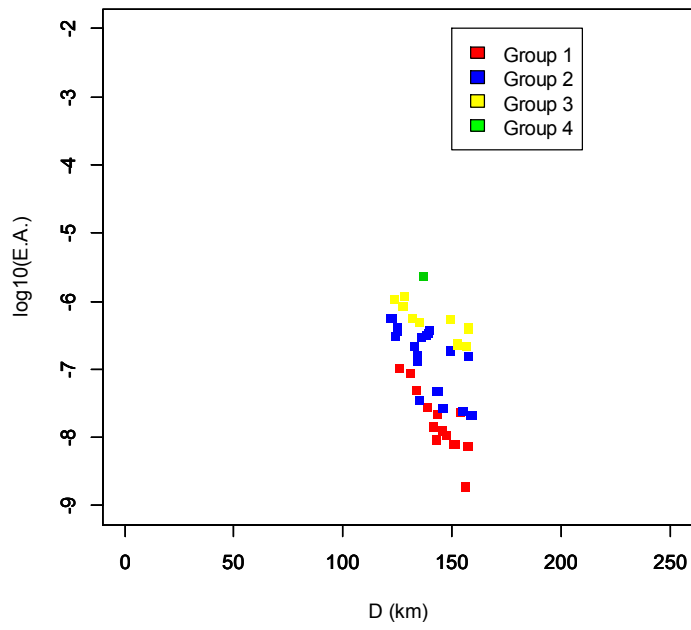
b) 1.0-2.0 Hz



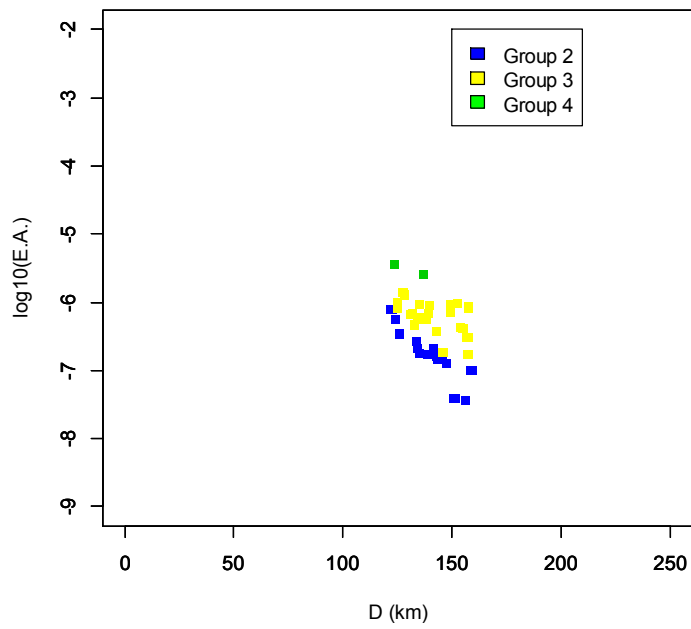
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

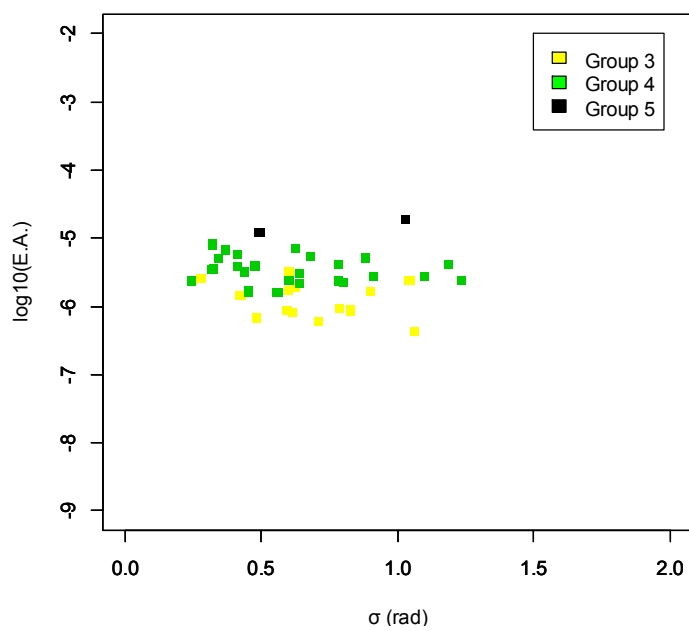


e) 5.0-10.0 Hz

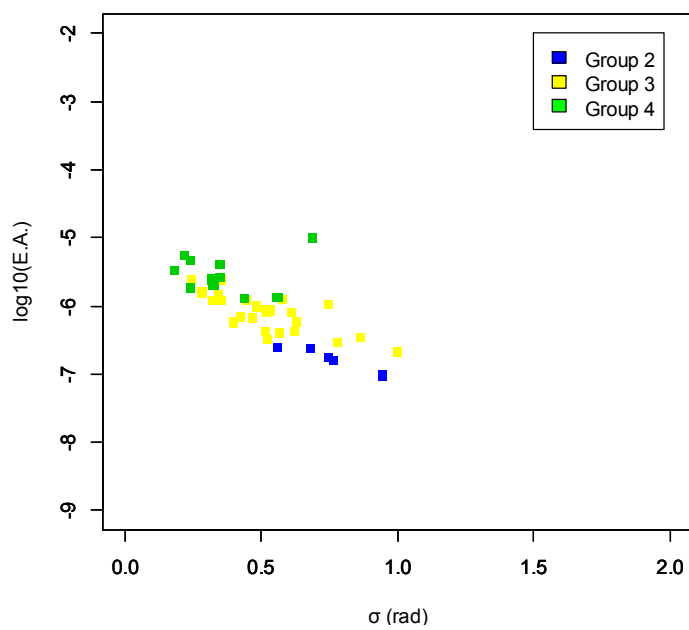


f) 0.1-10.0 Hz

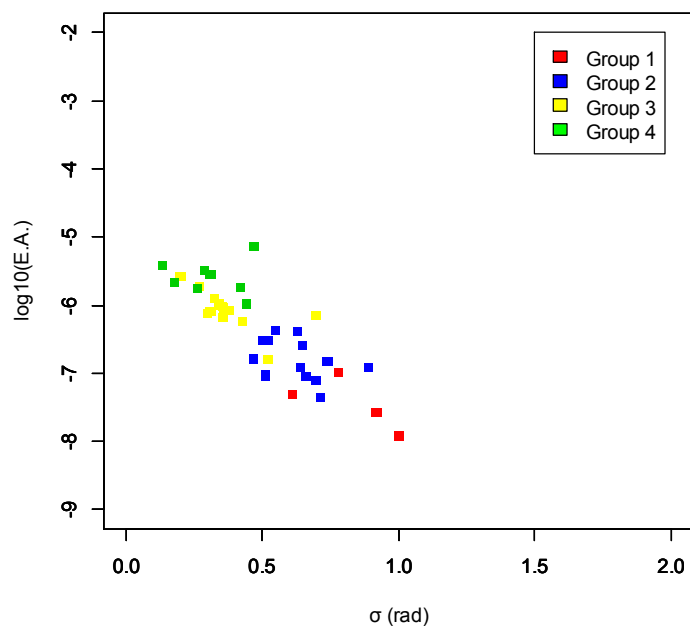
Fig.4.32: relations between D and $E.A.$ for 2001 Iwateken nairiku nanbu earthquake



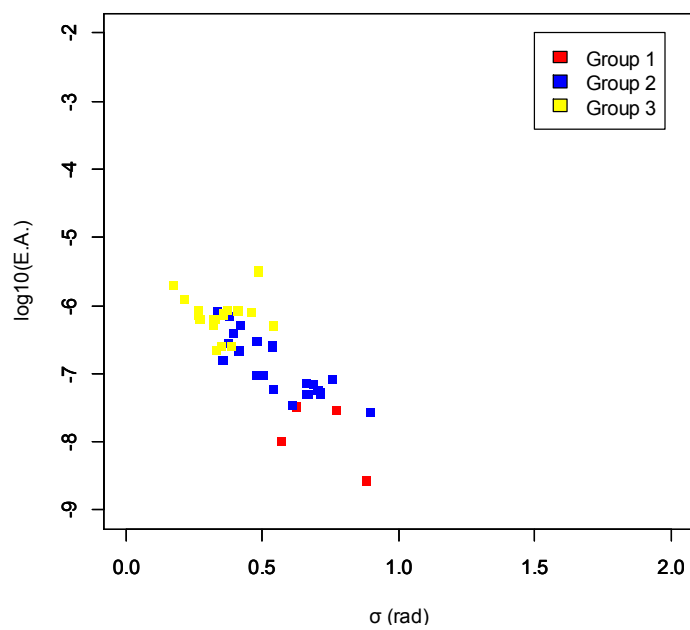
a) 0.1-1.0 Hz



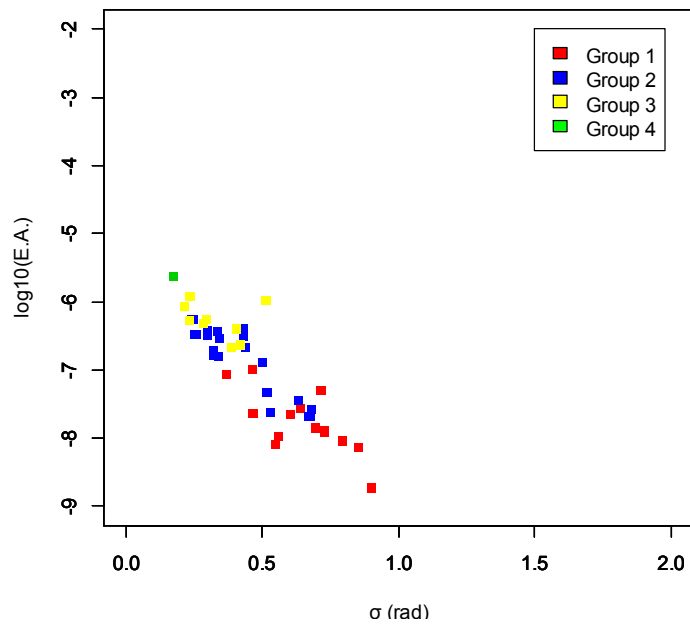
b) 1.0-2.0 Hz



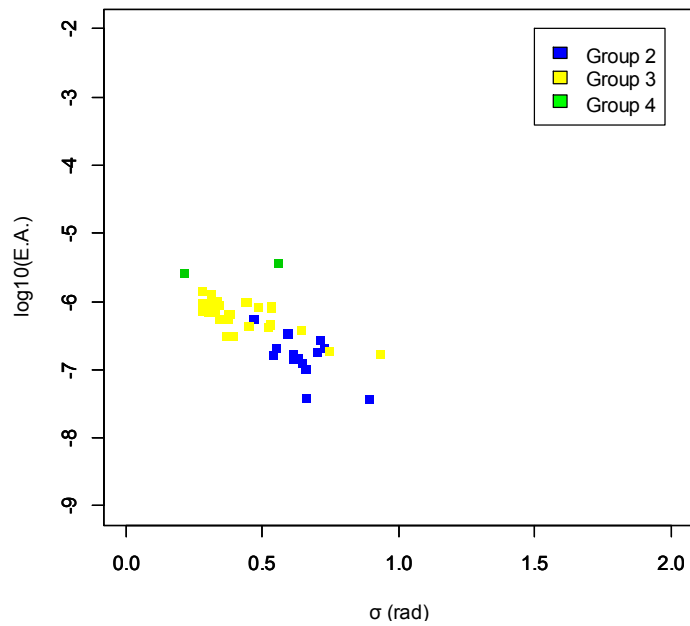
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

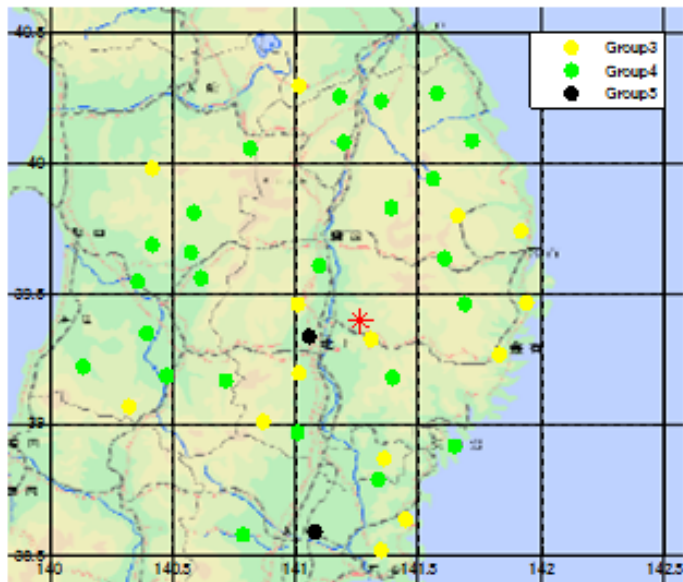


e) 5.0-10.0 Hz

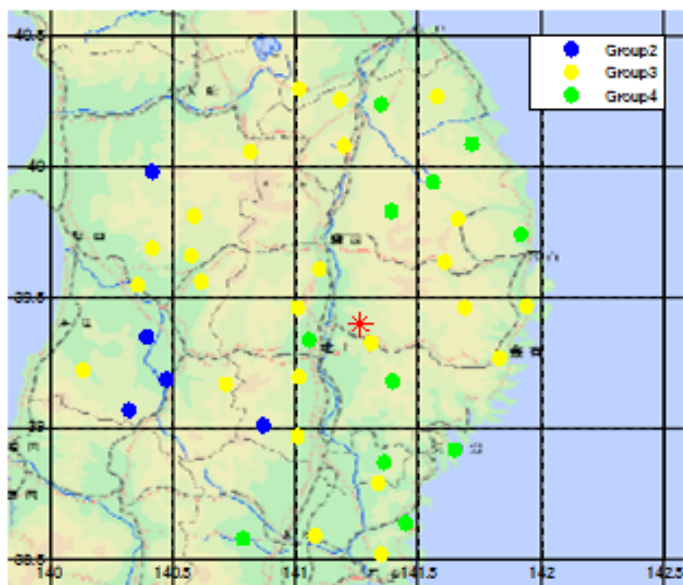


f) 0.1-10.0 Hz

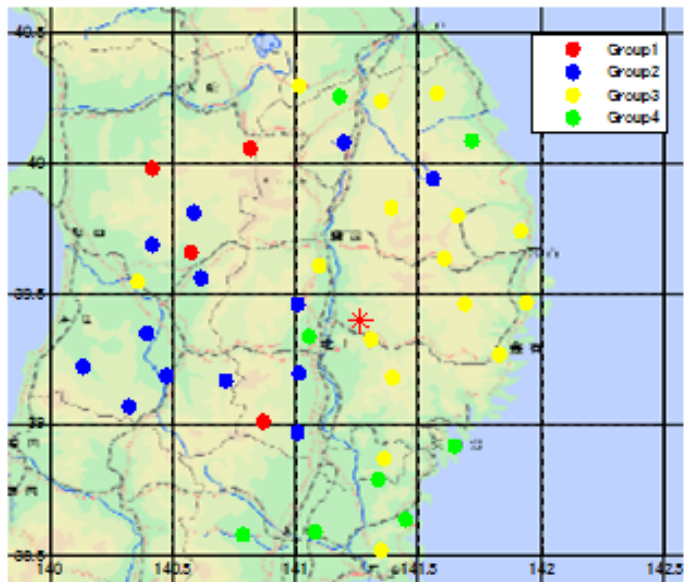
Fig.4.33: relations between σ and $E.A.$ for 2001 Iwateken nairiku nanbu earthquake



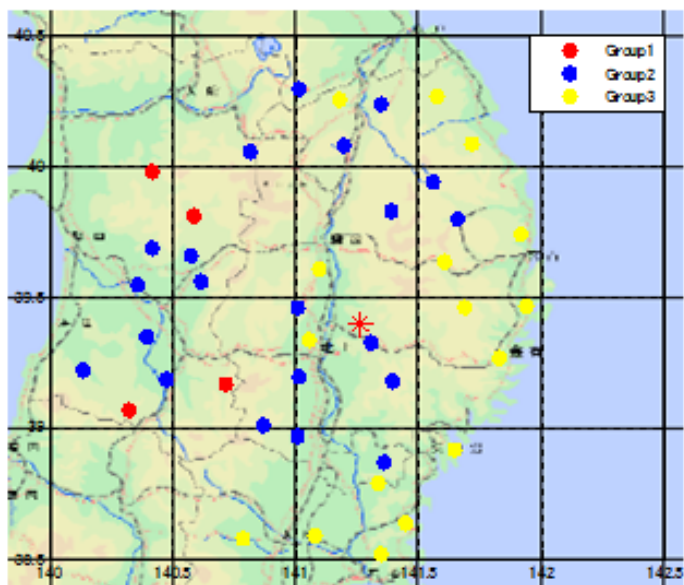
a) 0.1 – 1.0 Hz



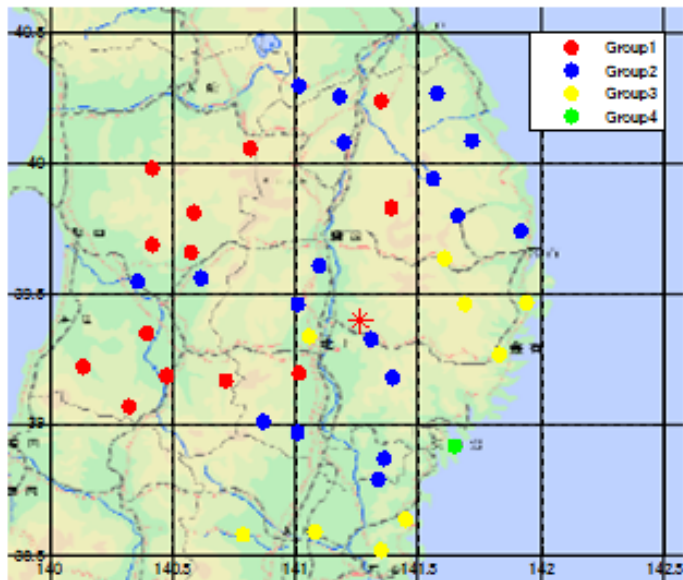
b) 1.0 – 2.0 Hz



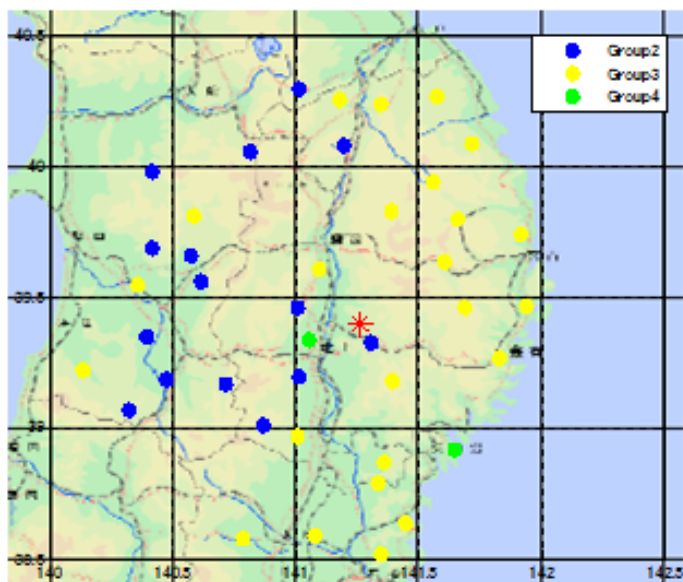
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



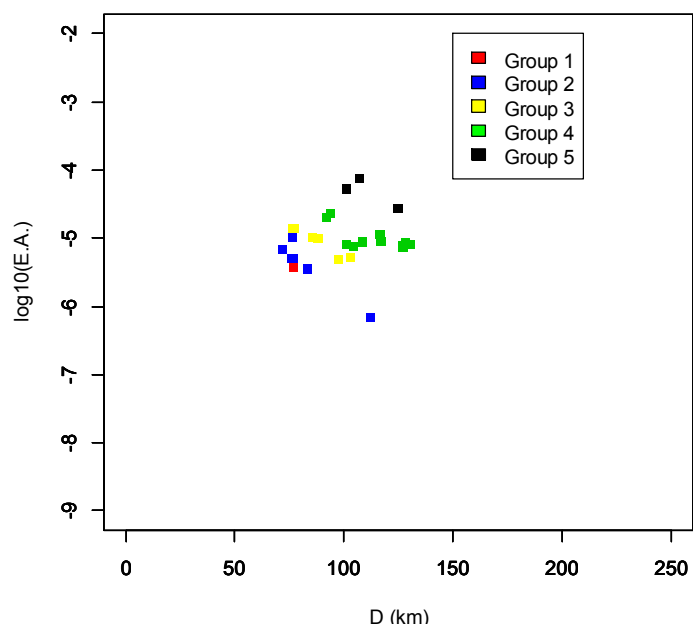
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.34: locations of sites in each Group for 2001 Iwateken nairiku nanbu earthquake

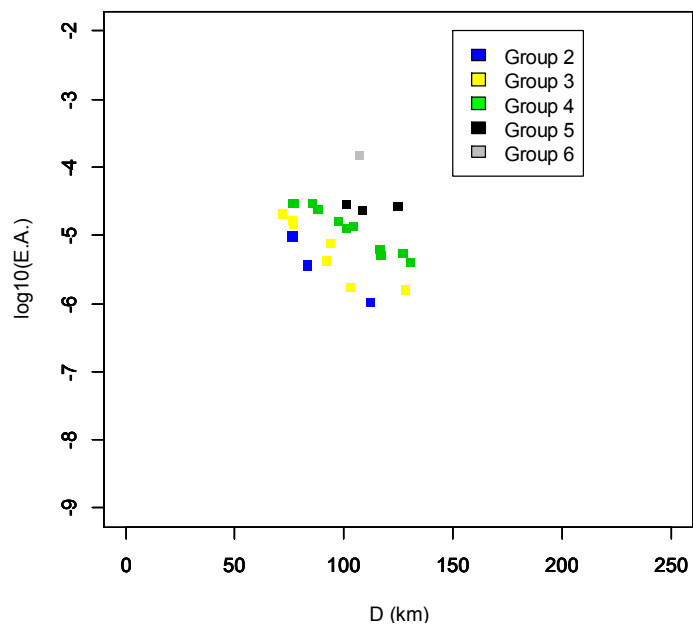
4. 3. 12 2003 年宮城県沖地震における結果

2003 年宮城県沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.35, Fig.4.36 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.37 に示す. Fig.4.35 と Fig.4.36 から次のような傾向を見て取れる.

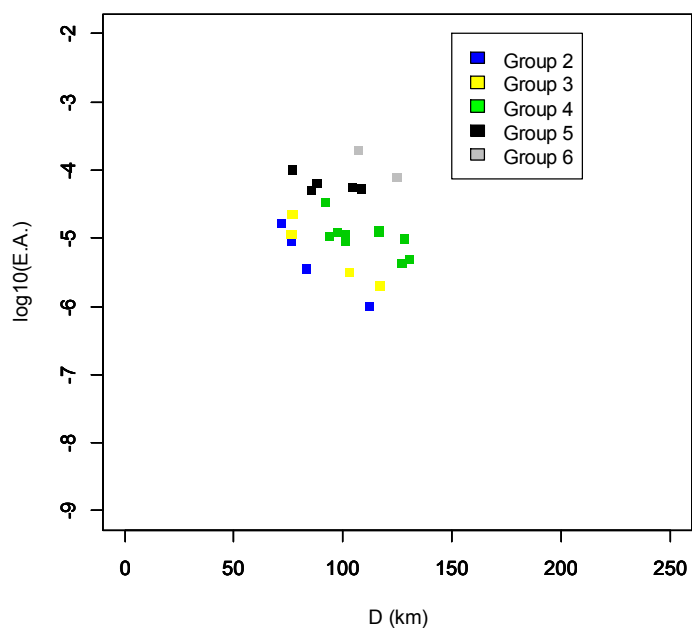
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係では, Group 間の差が大きいが, 高周波数帯域では Group 間の差は小さい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



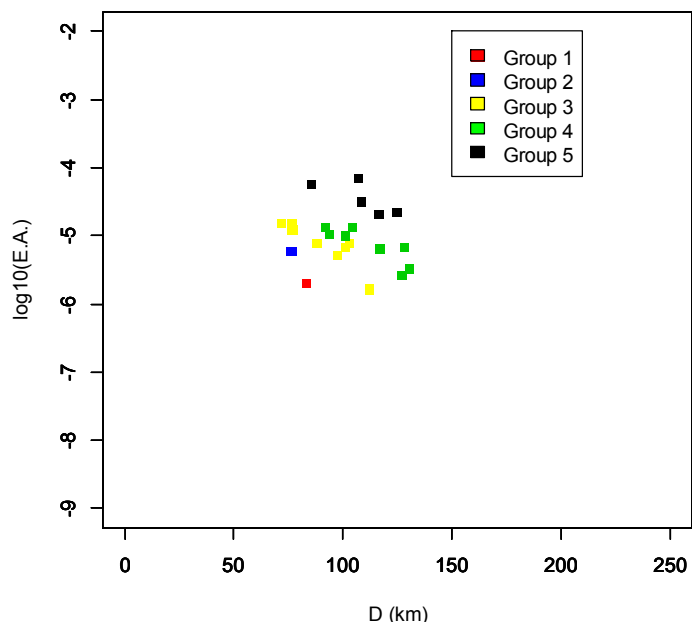
a) 0.1-1.0 Hz



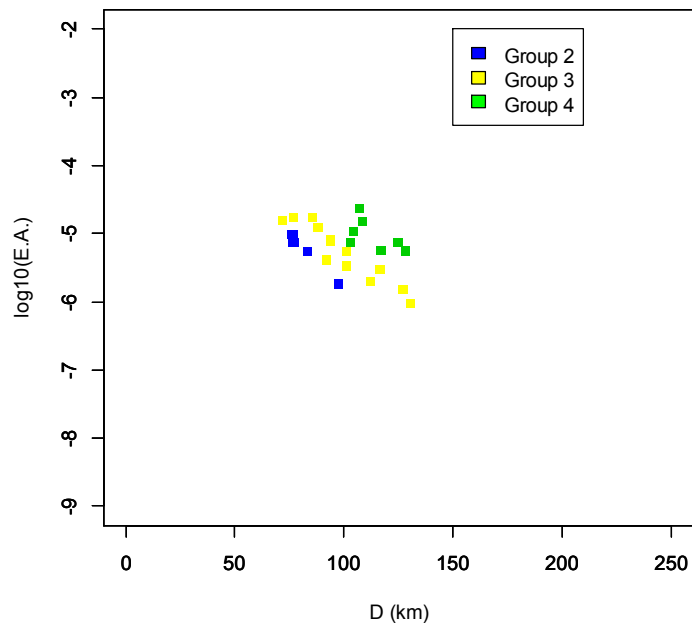
b) 1.0-2.0 Hz



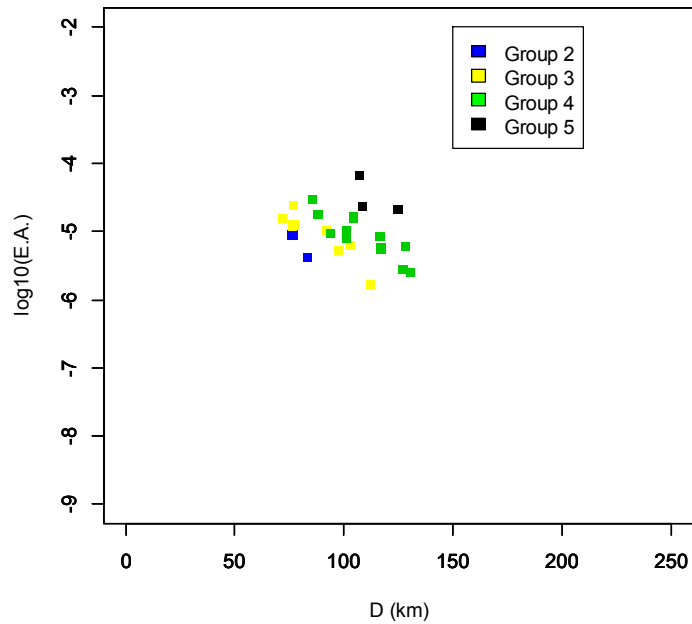
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

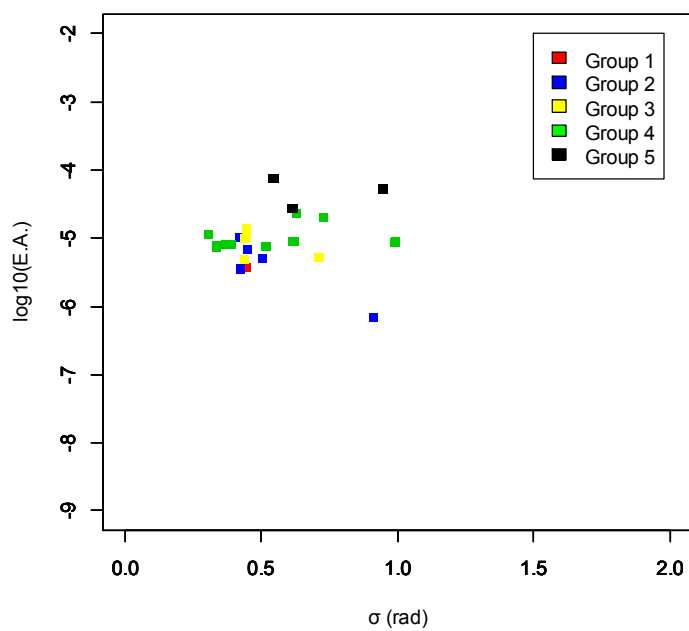


e) 5.0-10.0 Hz

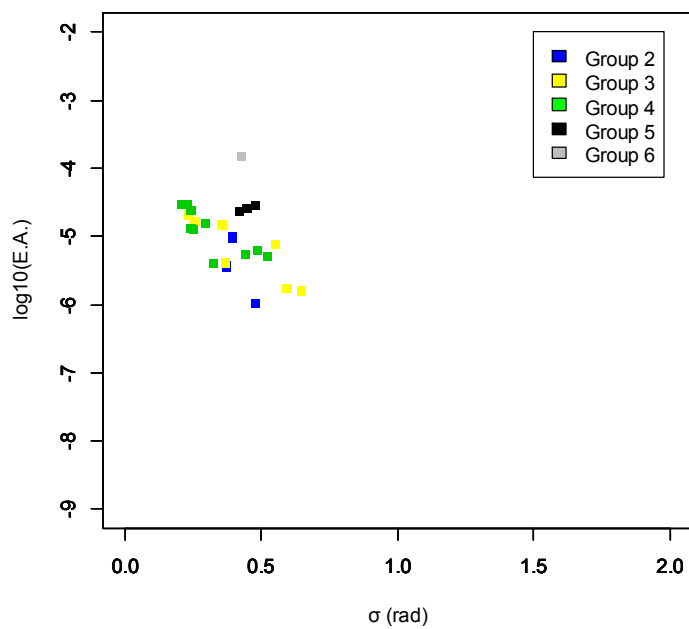


f) 0.1-10.0 Hz

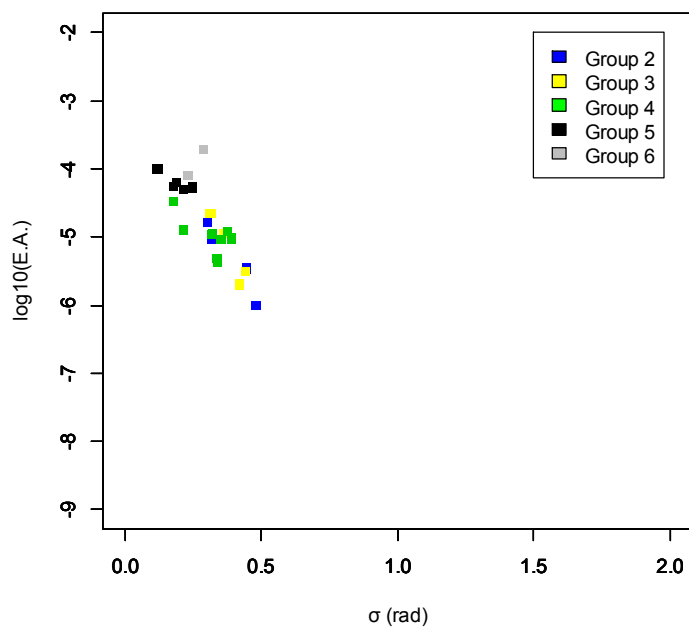
Fig.4.35: relations between D and $E.A.$ for 2003 Miyagiken oki earthquake



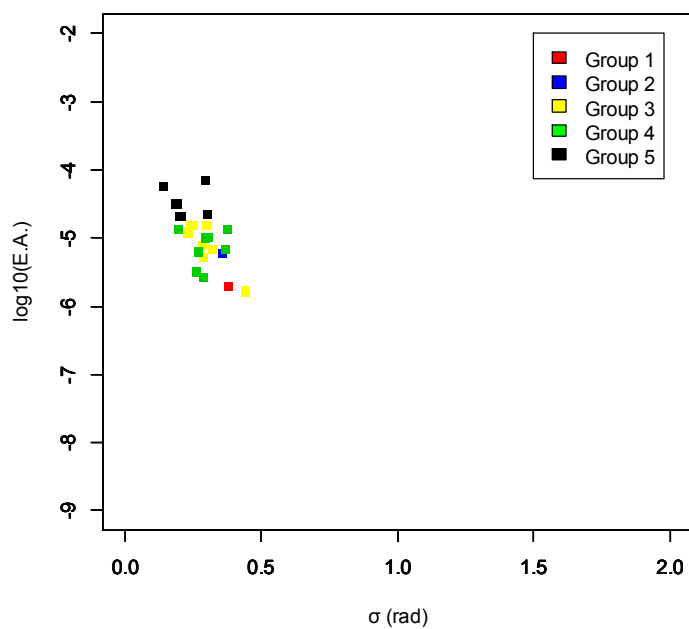
a) 0.1-1.0 Hz



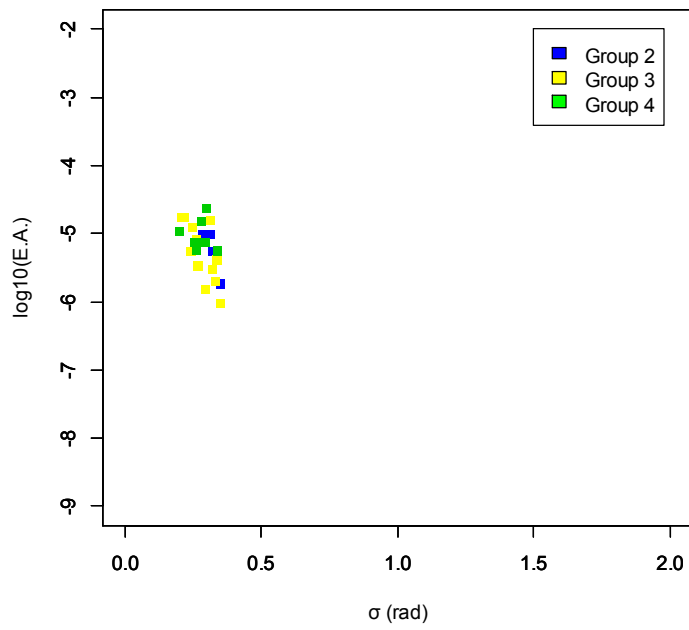
b) 1.0-2.0 Hz



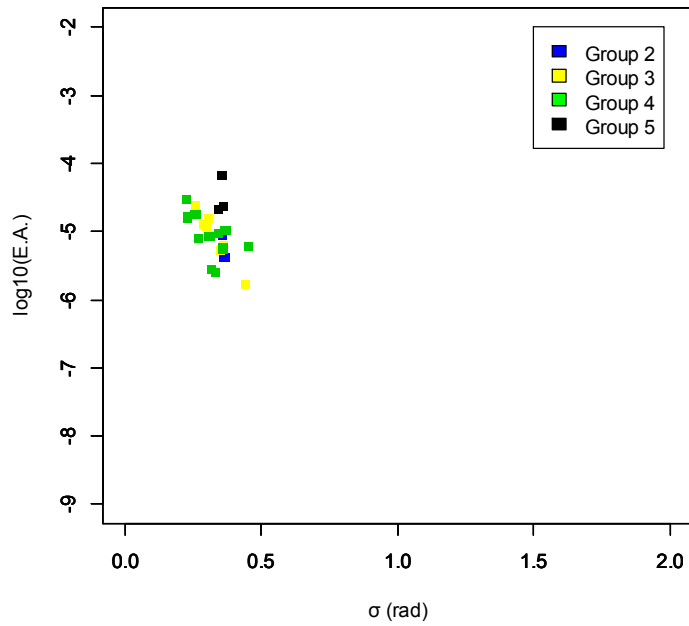
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

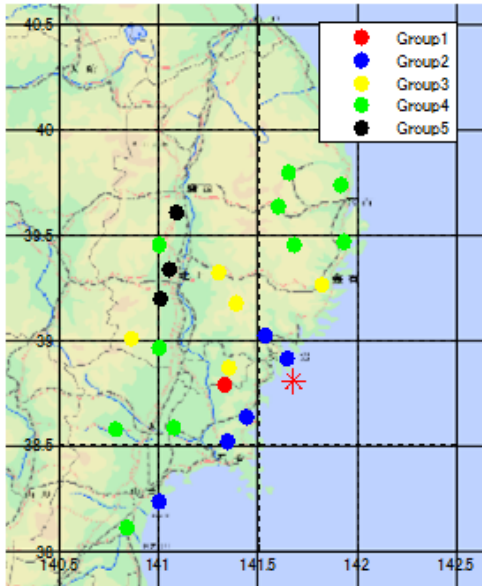


e) 5.0-10.0 Hz

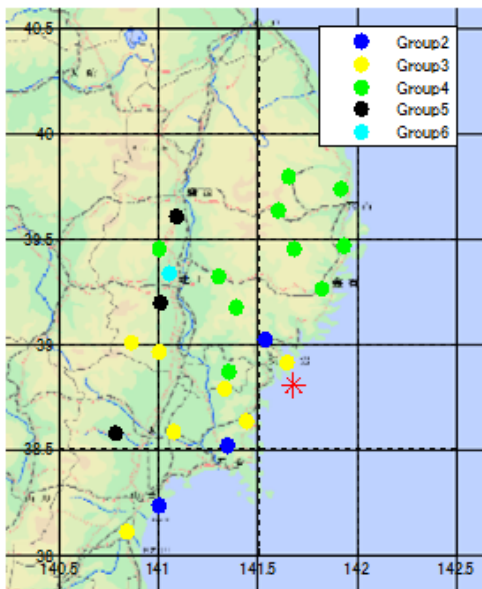


f) 0.1-10.0 Hz

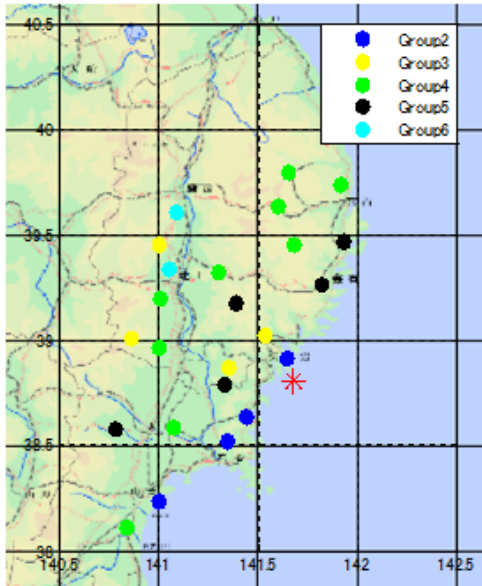
Fig.4.36: relations between σ and $E.A.$ for 2003 Miyagiken oki earthquake



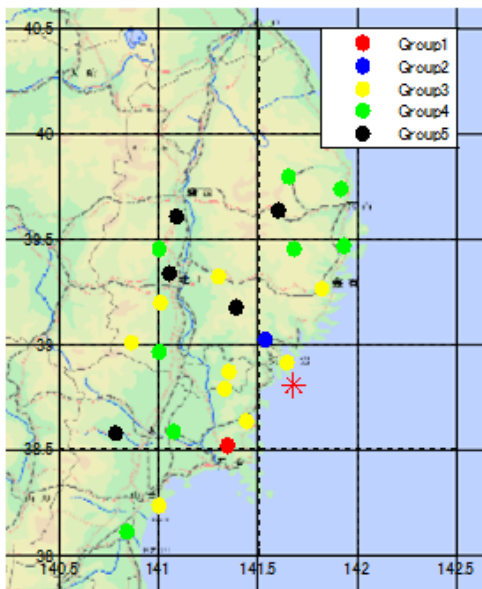
a) 0.1 – 1.0 Hz



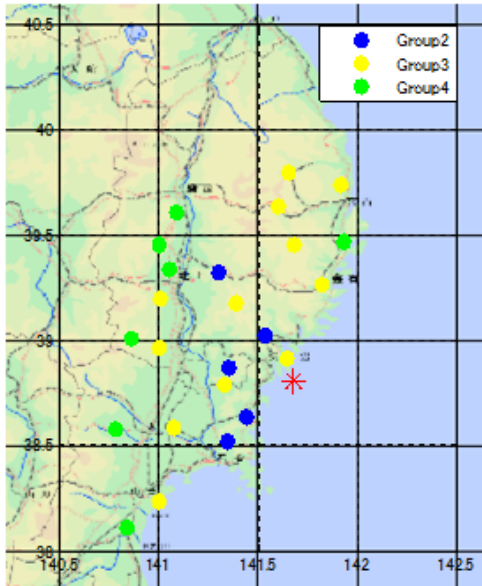
b) 1.0 – 2.0 Hz



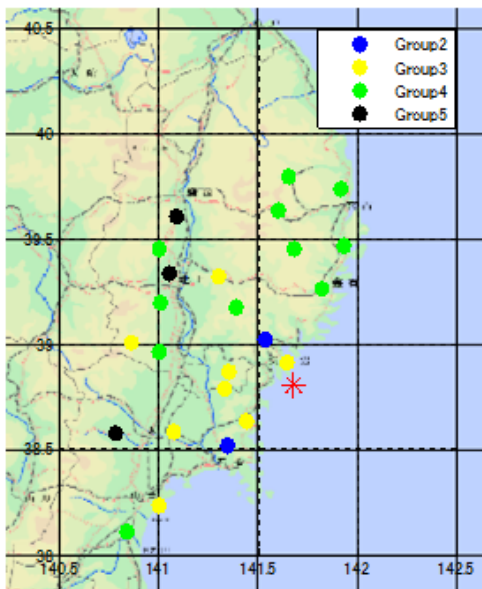
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



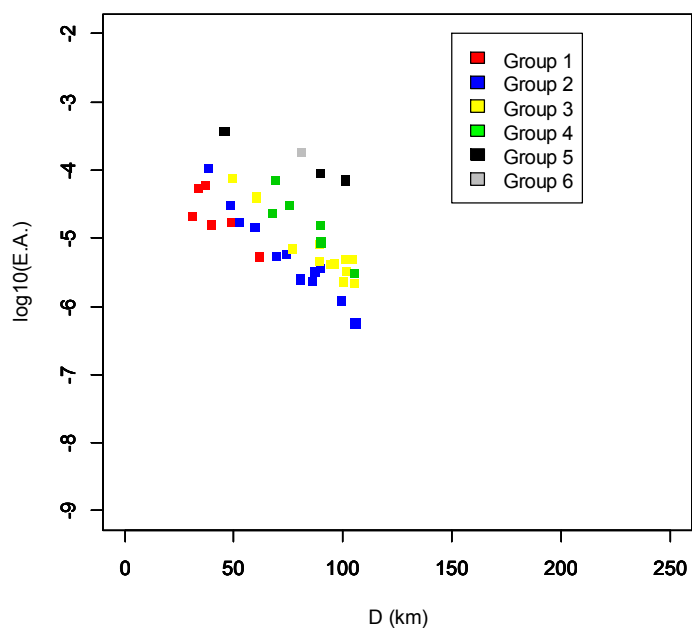
f) 0.1 – 10.0 Hz

Fig.4.37: locations of sites in each Group for 2003 Miyagiken-oki earthquake

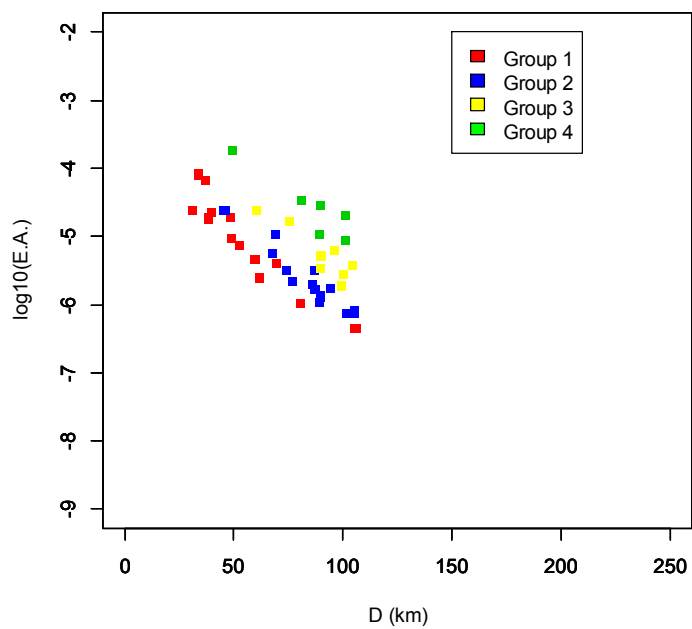
4.3.13 2009 年駿河湾沖地震における結果

2009 年駿河湾沖地震から得られた D と $E.A.$, および位相差分の σ と $E.A.$ との関係を周波数帯域毎にそれぞれ Fig.4.38, Fig.4.39 に示す. またそれぞれの Group に含まれる観測サイトの位置関係を Fig.4.40 に示す. Fig.4.38 と Fig.4.39 から次のような傾向を見て取れる.

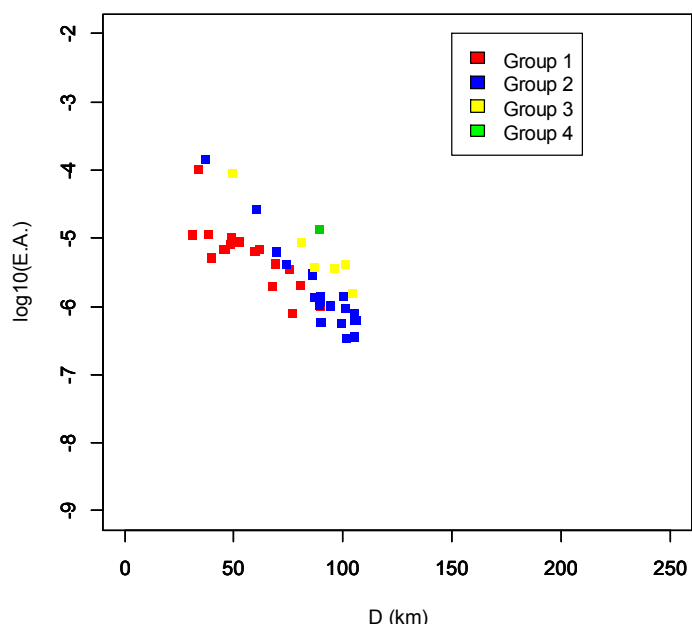
- ア) Group 毎の D と $E.A.$ の関係はまとまっており, また Group 間の差も比較的明瞭である
- イ) 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係では Group 間の差は大きい
- ウ) σ と $E.A.$ の関係の勾配は高周波数になるほど急になる



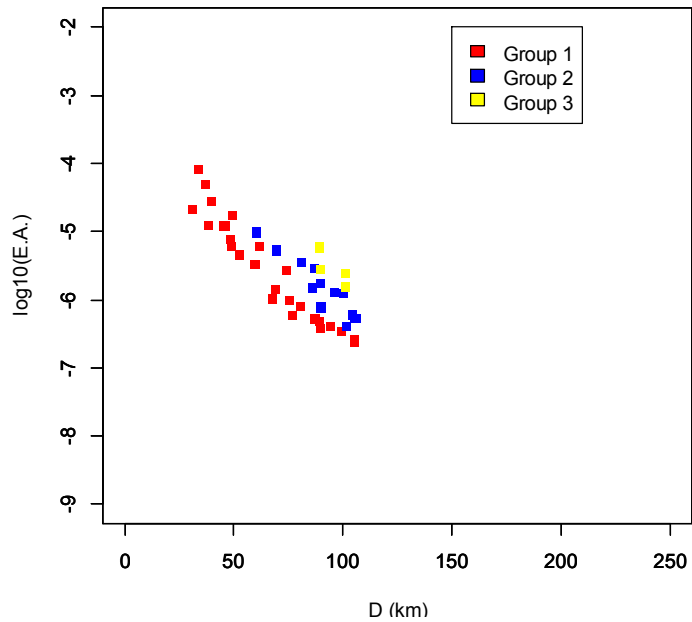
a) 0.1-1.0 Hz



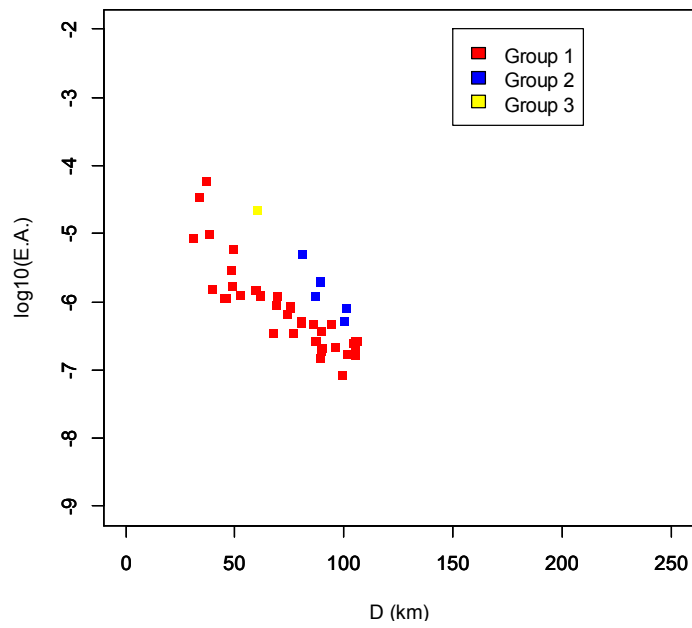
b) 1.0-2.0 Hz



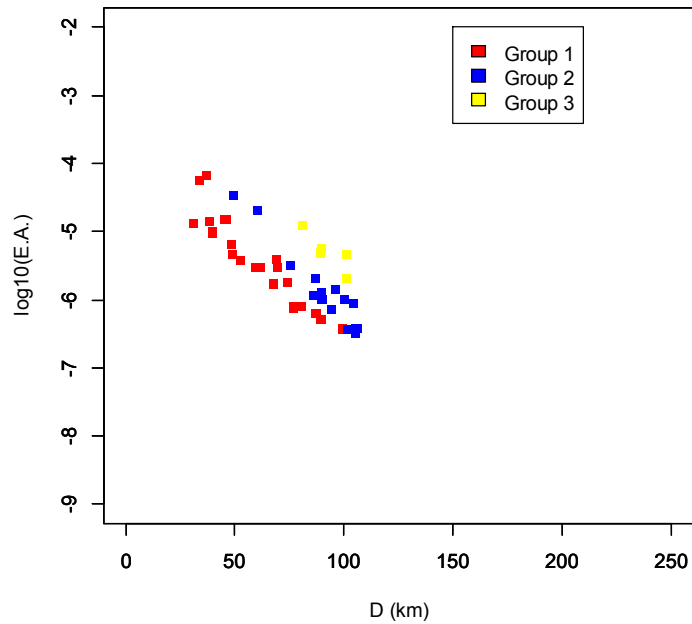
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

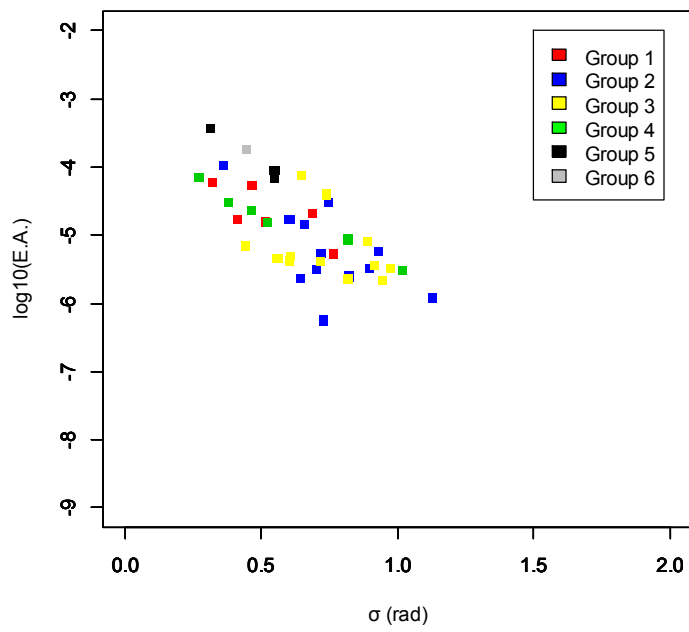


e) 5.0-10.0 Hz

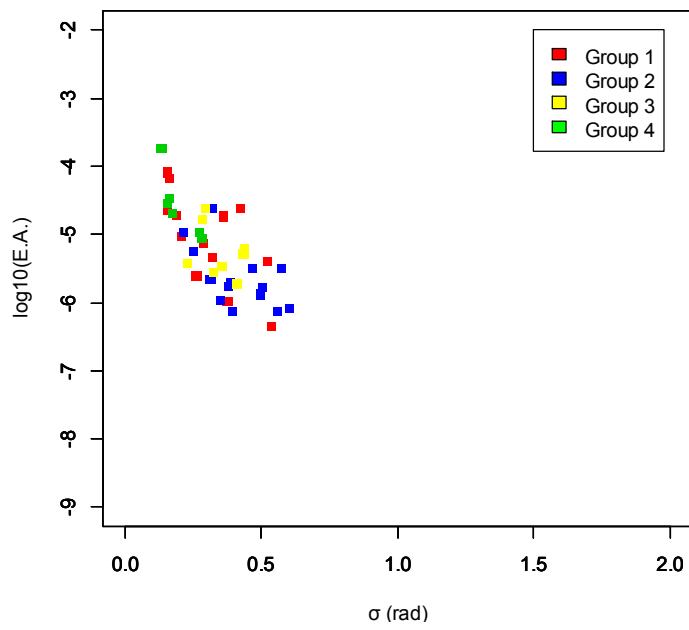


f) 0.1-10.0 Hz

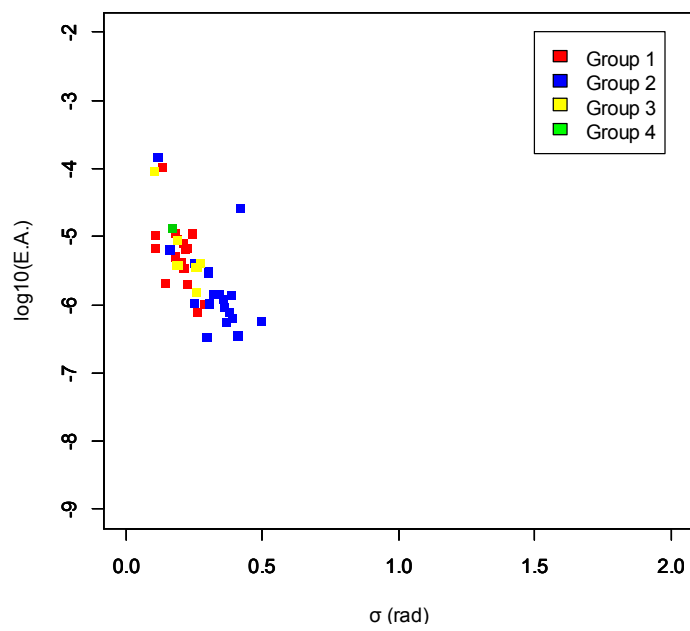
Fig.4.38: relations between D and $E.A.$ for 2009 Surugawan earthquake



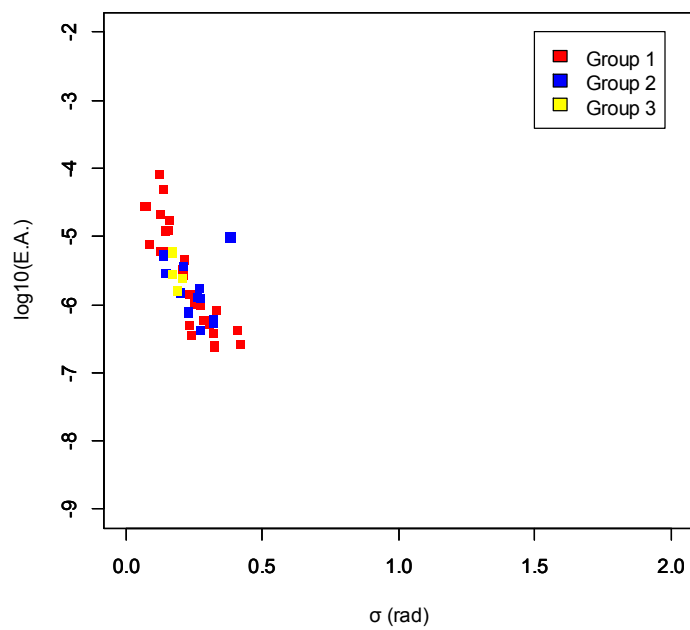
a) 0.1-1.0 Hz



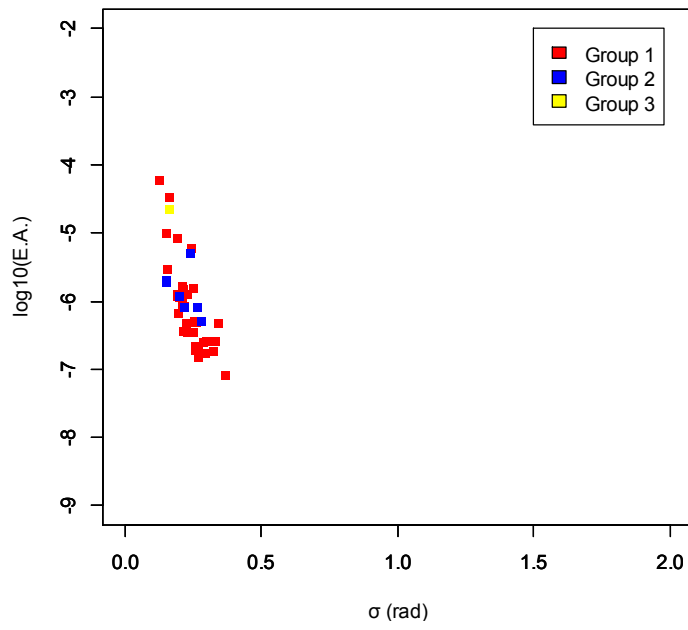
b) 1.0-2.0 Hz



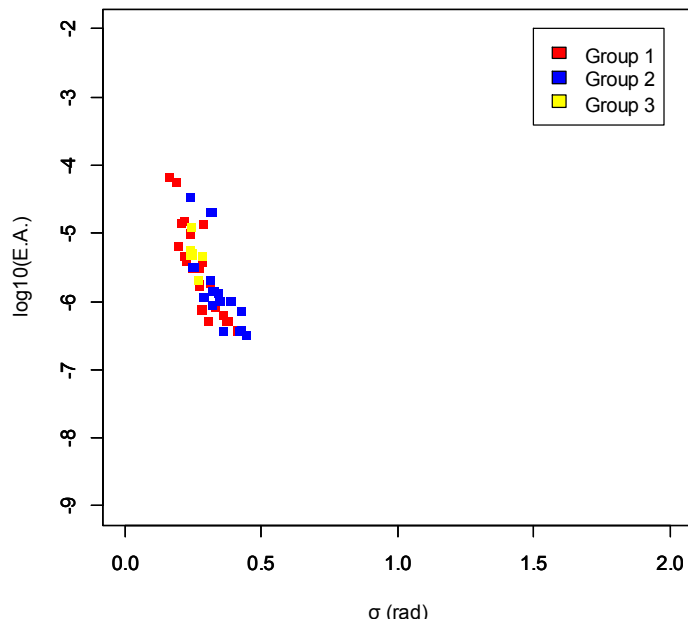
c) 2.0-3.0 Hz



d) 3.0-5.0 Hz

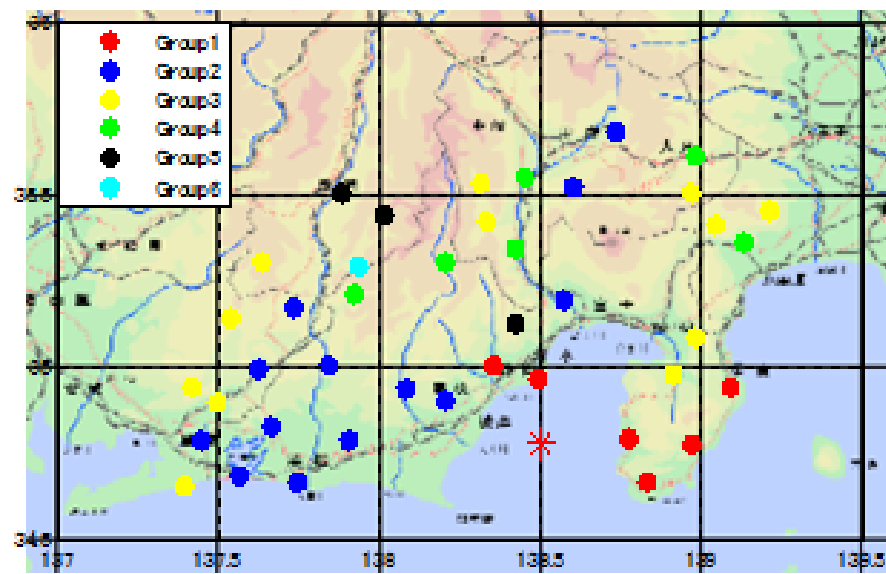


e) 5.0-10.0 Hz

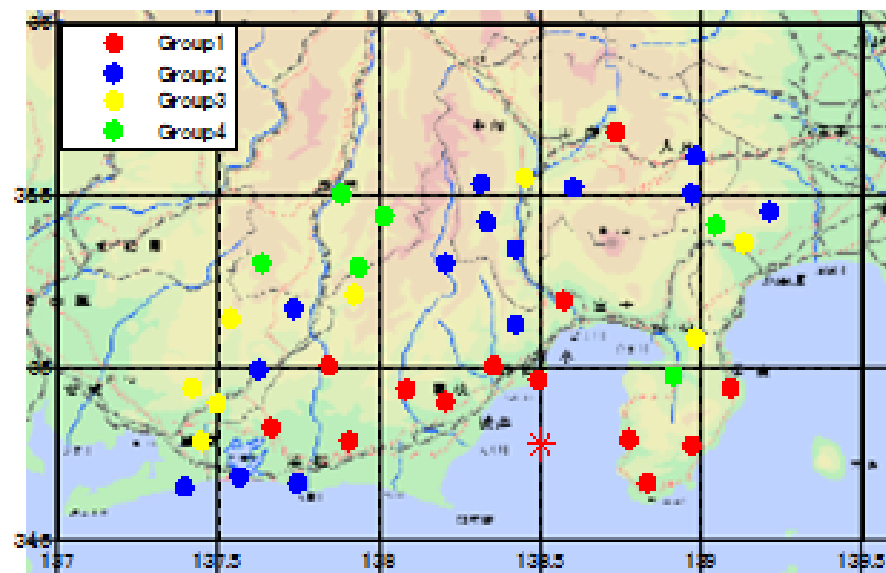


f) 0.1-10.0 Hz

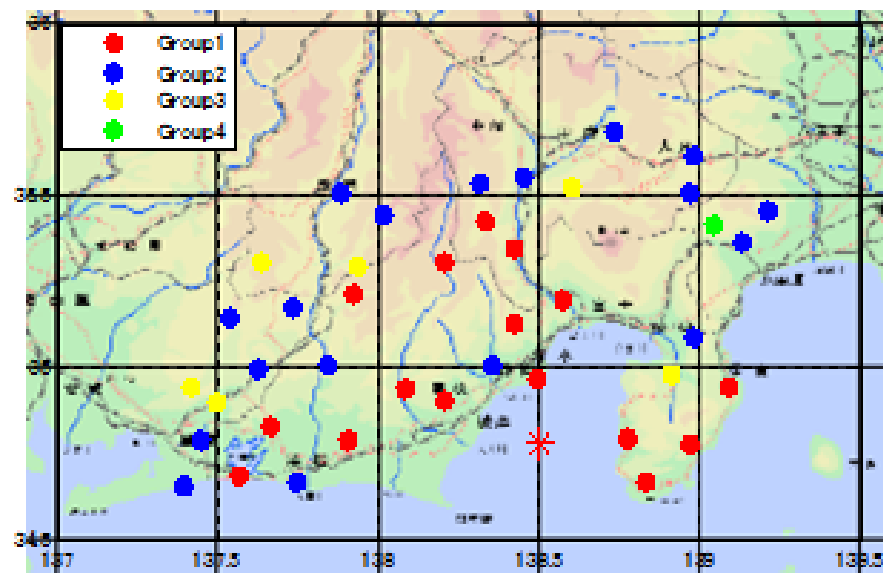
Fig.4.39: relations between σ and $E.A.$ for 2009 Surugawan earthquake



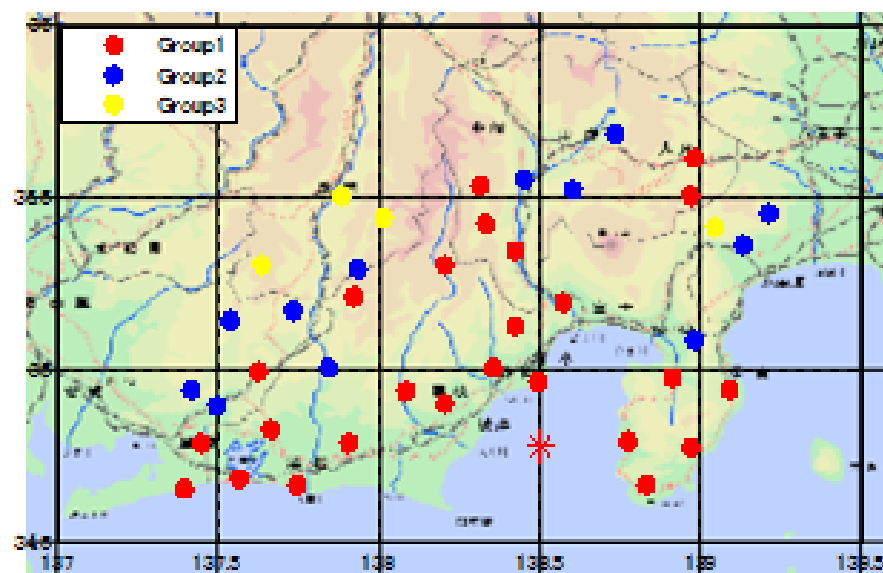
a) 0.1 – 1.0 Hz



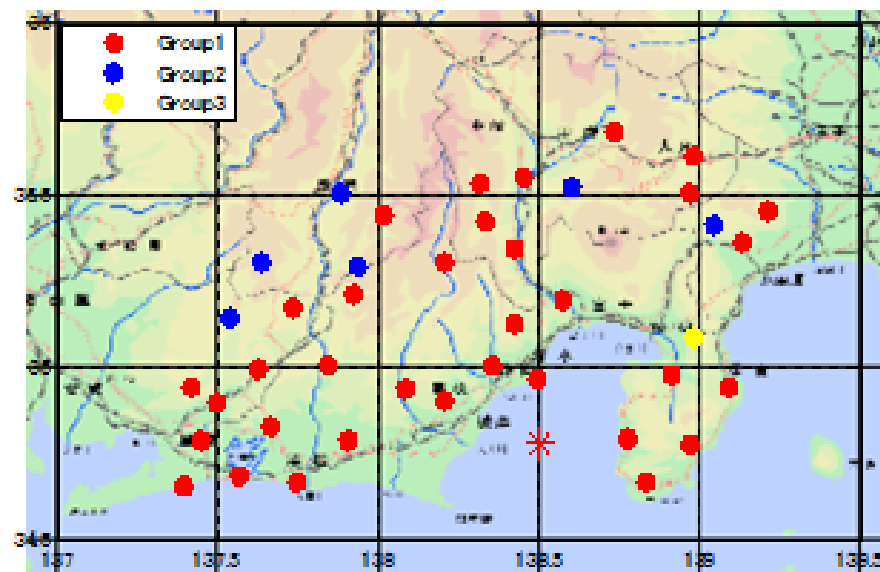
b) 1.0 – 2.0 Hz



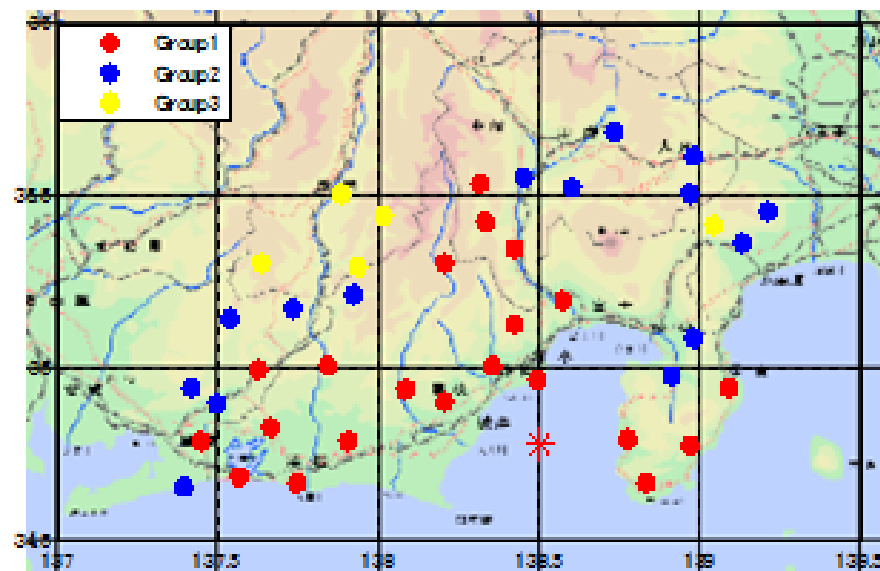
c) 2.0 – 3.0 Hz



d) 3.0 – 5.0 Hz



e) 5.0 – 10.0 Hz



f) 0.1 – 10.0 Hz

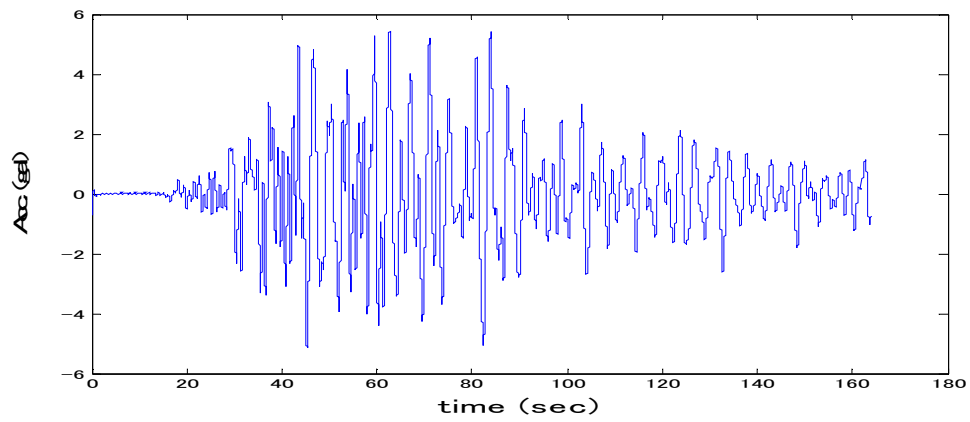
Fig.4.40: locations of sites in each Group for Surugawan earthquake

4.4 特徴的ないくつかの観測点について

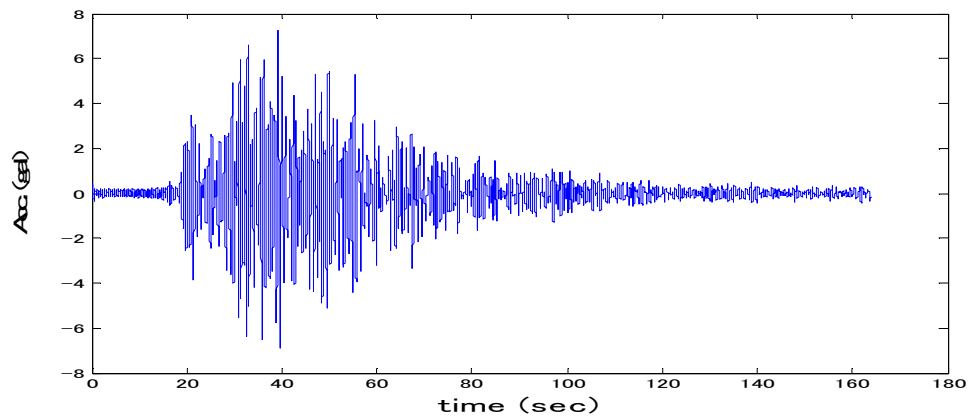
前節で Table.1.1 に挙げられた地震の観測波形について、震源距離 D とエネルギー減衰 $E.A.$ 、および位相差分の標準偏差 σ と $E.A.$ との関係を調べた。

検討した地震の中には $0.1 - 1.0$ Hz における σ と $E.A.$ の関係が、 σ が大きいにも関わらず $E.A.$ も大きいままであるために、ばらついているものがある。そのような特徴を示したのは、2004 年新潟県中越地震、2007 年能登半島沖地震、2007 年新潟県中越沖地震、2008 年岩手・宮城内陸地震、2003 年十勝沖地震、2005 年宮城県沖地震、2011 年三陸沖地震、2001 年岩手県内陸南部地震、2003 年宮城県沖地震、そして 2009 年駿河湾の地震である。一般に震源から遠ざかってエネルギーが散逸すると、継続時間、すなわち位相差分の σ が大きくなる。

著者は、“高 σ かつ高 $E.A.$ ” という傾向を示す観測波形は厚い堆積層の上に位置する観測点で得られたものであるということに着目した。西川・他 (2008)¹¹⁾ によれば大規模な堆積盆地や小規模な沖積平野では堆積層表面波（堆積層に閉じ込められ、表面波として伝播するやや長周期地震動）が観測されることが知られている。堆積層上にあるサイトではこういった表面波の影響も考えられる。Fig.4.41 に堆積層の上に位置するある観測点における $0.1 - 1.0$ Hz と $1.0 - 2.0$ Hz の成分波の例を示す。 $0.1 - 1.0$ Hz における成分波は、表面波に特徴的な後続部での大きな振幅が認められる。



a) filtered in 0.1 – 1.0 Hz band



b) filtered in 1.0 – 2.0 Hz band

Fig.4.41: example of ground motion recorded at a site above deep sedimentary layer

そこで著者は前に述べた 10 の地震において, $V_s > 2000$ m/s の硬質な基盤が 450 m より深い観測点 (deep) とそうでない観測点 (shallow) に分けた上で, 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係を調べてみることにした. その結果を 10 の地震毎に Fig.4.42 から Fig.4.51 に順に示す.

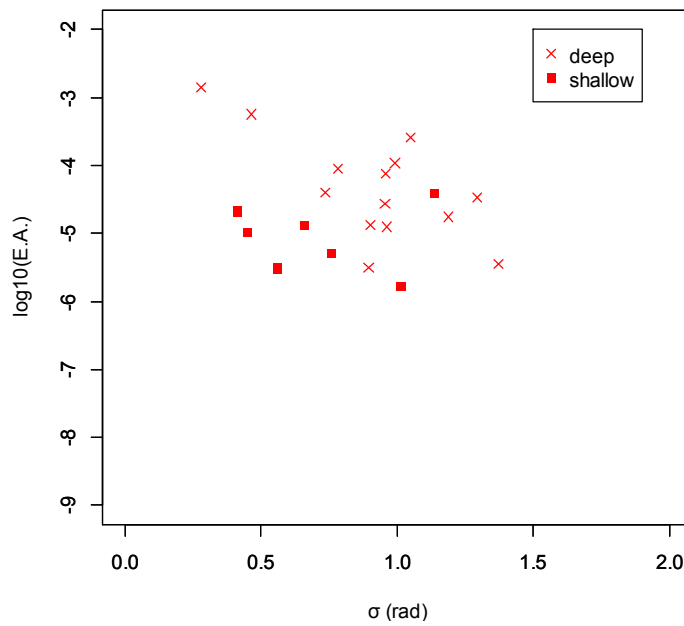


Fig.4.42: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2004 Niigataken chuetsu earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

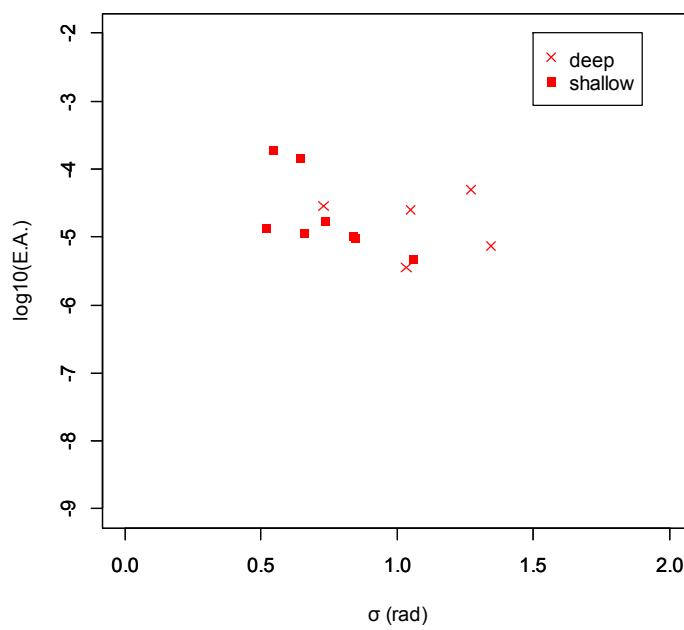


Fig.4.43: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2007 Notohanto oki earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

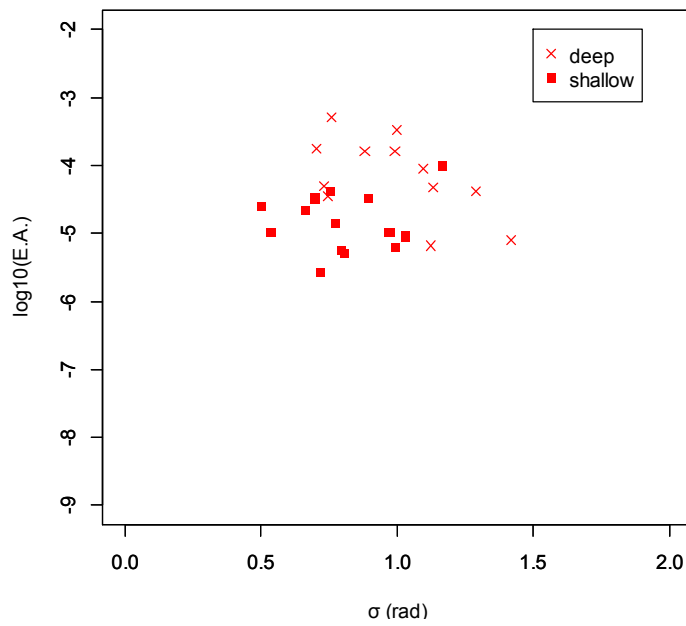


Fig.4.44: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2007 Niigataken chuetsuoki earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

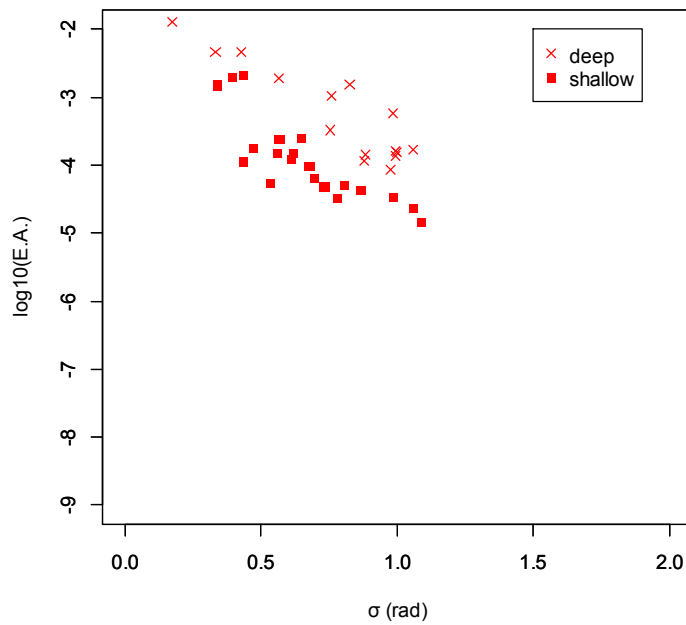


Fig.4.45: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2008 Iwate-Miyagi nairiku earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

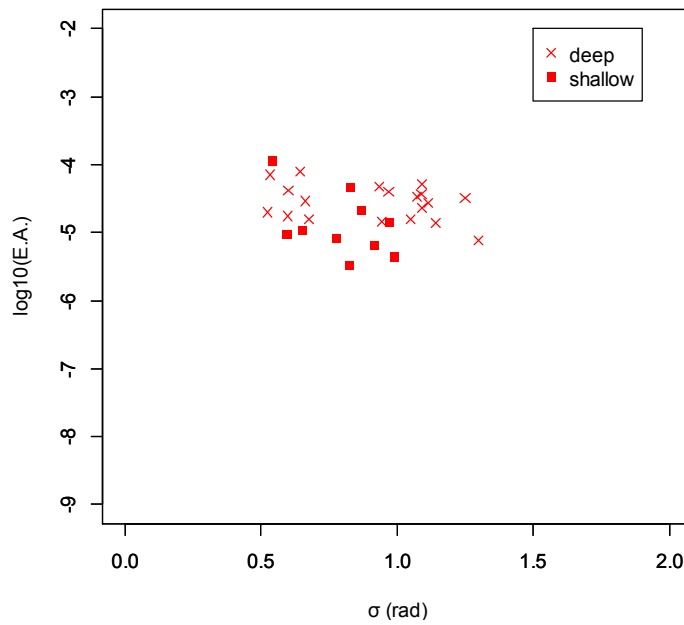


Fig.4.46: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2003 Tokachi oki earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

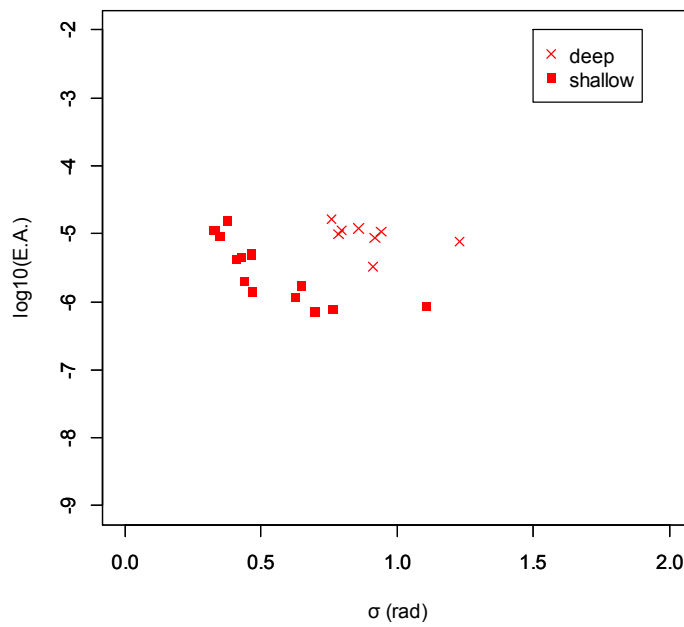


Fig.4.47: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2005 Miyagiken oki earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

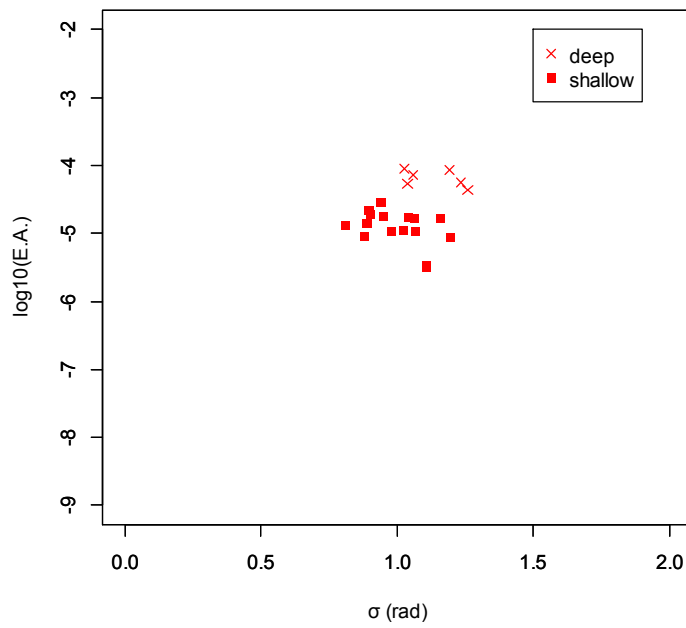


Fig.4.48: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2011 Sanriku oki earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

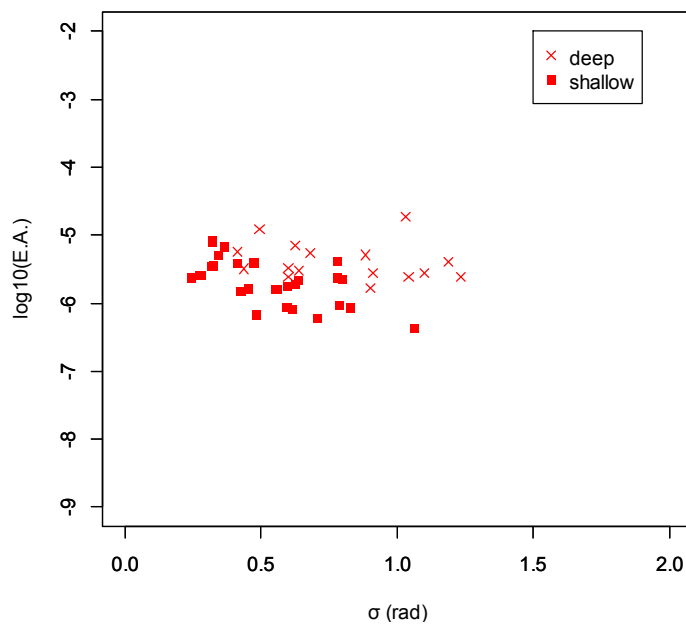


Fig.4.49: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2001 Iwateken nairiku nabu earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

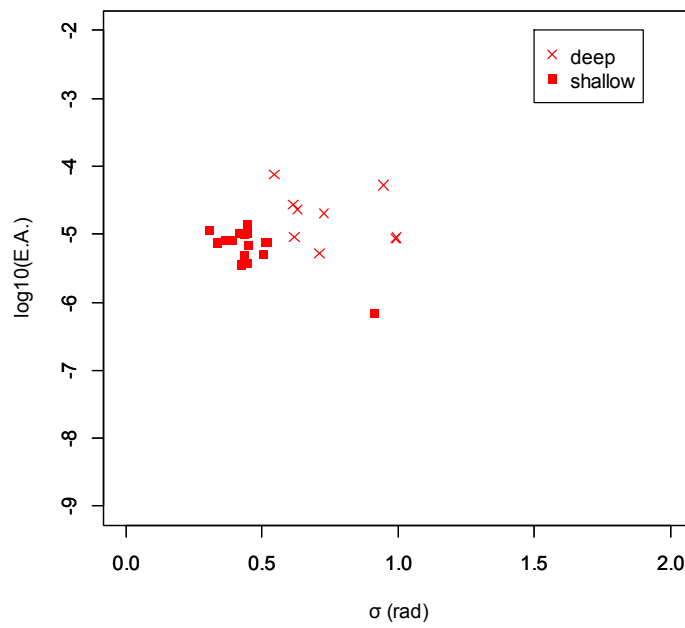


Fig.4.50: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2003 Miyagiken oki earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

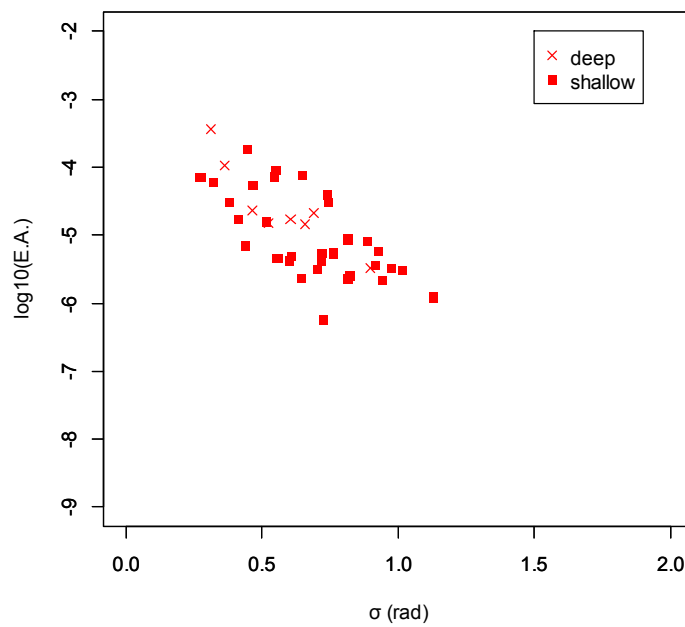


Fig.4.51: relation between σ and $E.A$ in 0.1 – 1.0 Hz for 2009 Surugawan earthquake

(red x marks are for sites where bedrock are located more than 450 m deep from the ground surface)

Fig.4.42 から Fig.4.51 までの deep と shallow のデータの違いを見ると 2009 年駿河湾の地震を除いていずれの地震においても全体的に deep のデータの方が shallow よりも σ が大きく, $E.A.$ も大きい. このことより基盤が深いところに位置する観測点の 0.1 – 1.0 Hz の波形では, 位相差分の σ と $E.A.$ が共に高いという傾向が見て取れる. 実際の地震動シミュレーションにおいては, こういった堆積層の影響があるサイトとないサイトを別々に考慮する必要があるだろう.

4.5 全体的な傾向

著者は地震を直下型・プレート境界・スラブ内に大分しデータをまとめた.

4.5.1 直下型地震

Fig.4.52 に直下型地震全体の 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係を示す. 4.4 節で議論した, 硬質の基盤が地表から 450 m 以上の深さにあるサイトを含むためばらつきが大きい. これらのデータを除いた結果を Fig.4.53 に示す. 2008 年岩手・宮城内陸地震以外の地震の結果が概ね同じような線上に乗る. また基盤が地表から 450 m 以上の深さにあるサイトの σ と $E.A.$ の関係を Fig.4.54 に示す. この図から全ての地震の結果がまとまっていることを見て取れる.

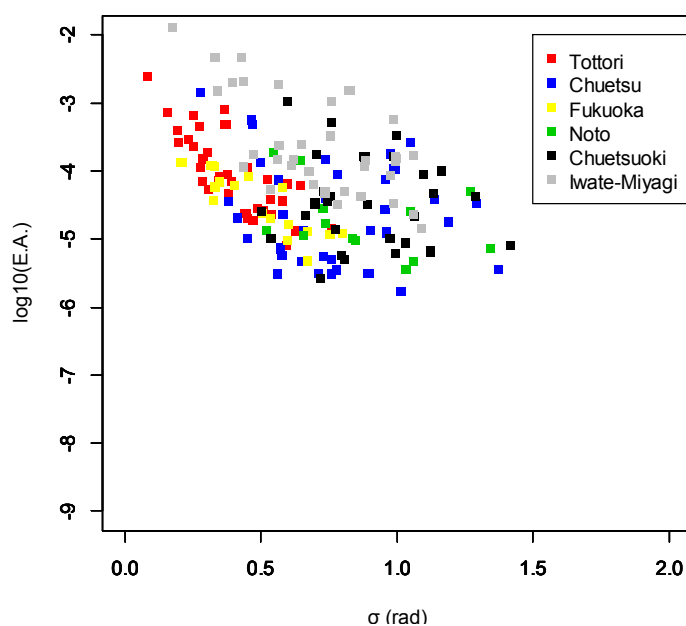


Fig.4.52: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz (all data considered)

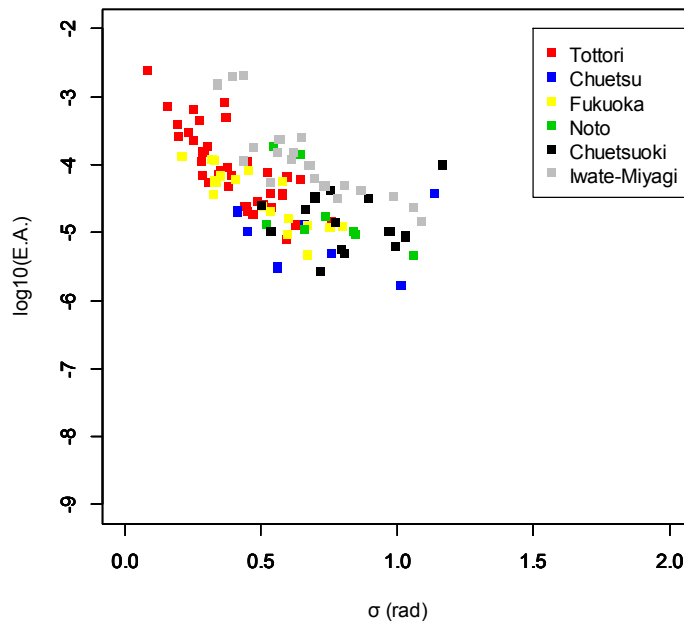


Fig.4.53: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz

(sites where bedrock are located more than 450 m from the ground surface are eliminated)

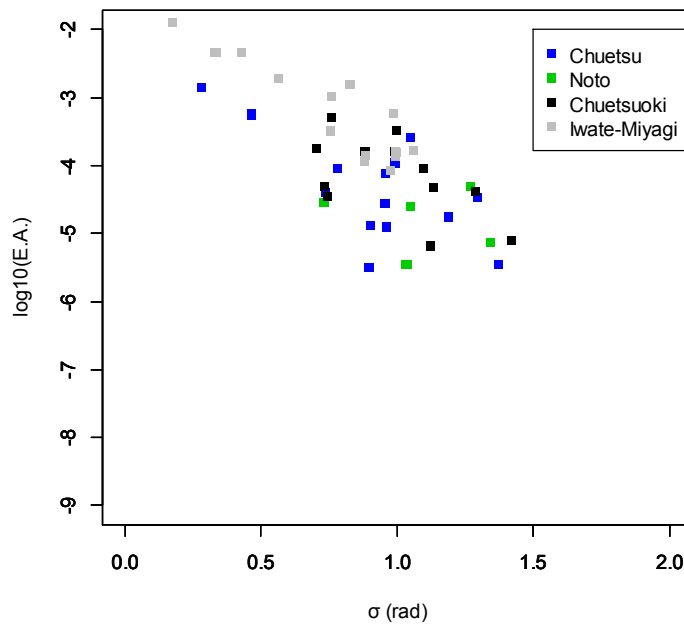


Fig.4.54: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz

(only sites where bedrock are located more than 450 m from the ground surface are included)

0.1 - 1.0 Hz 以外の帯域における結果をそれぞれ Fig.4.55 から Fig.4.59 にそれぞれ示す. 個々の地震間では σ と $E.A.$ の傾きは異なるが, これらを全てまとめると 2008 年岩手・宮城内陸地震を除いて同じような線上にデータが乗る. また高周波数帯域に行くほどプロットの勾配が大きい.

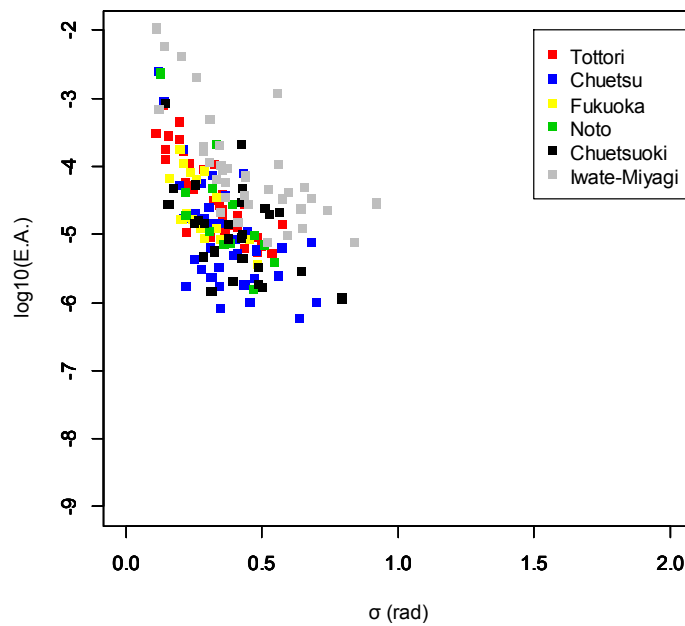


Fig.4.55: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 1.0 - 2.0 Hz

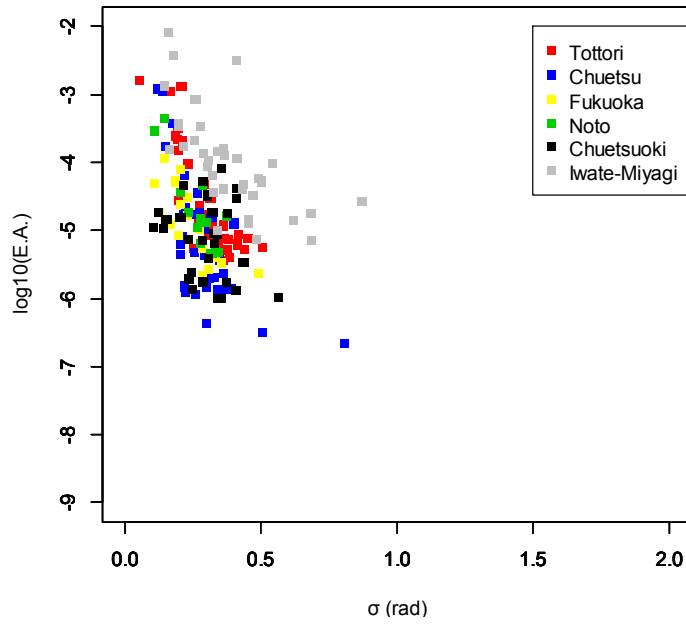


Fig.4.56: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 2.0 – 3.0 Hz

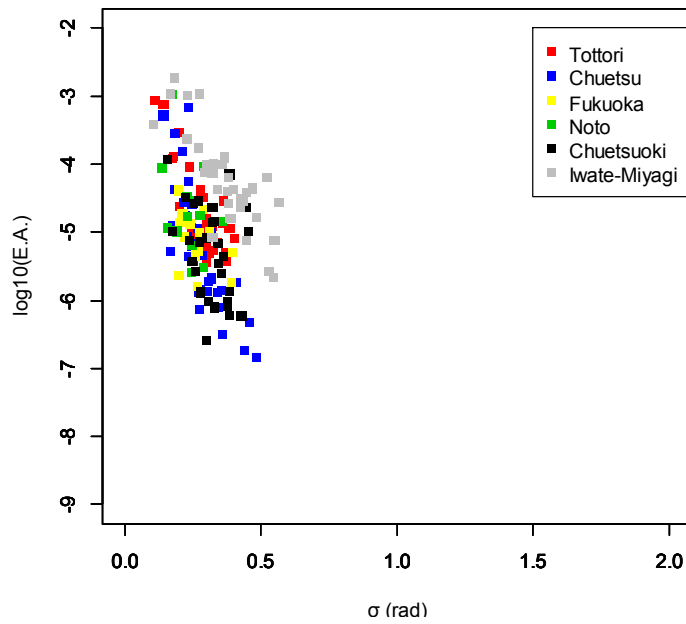


Fig.4.57: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 3.0 – 5.0 Hz

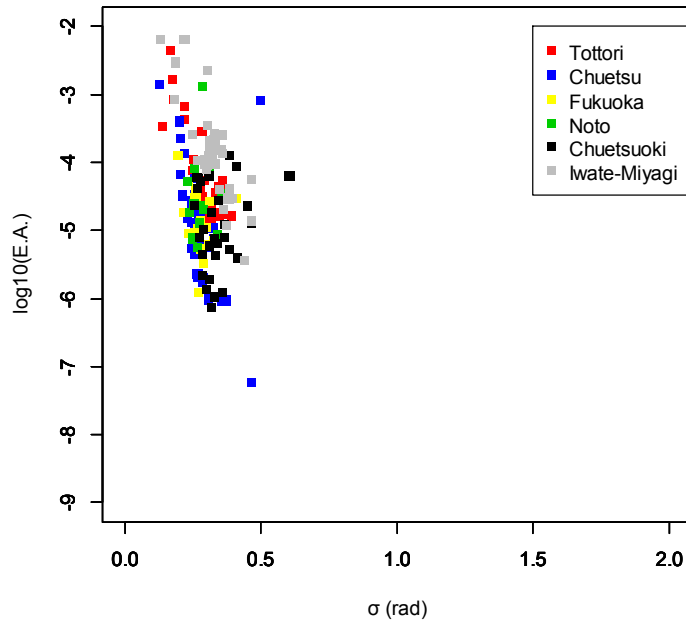


Fig.4.58: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 5.0 – 10.0 Hz

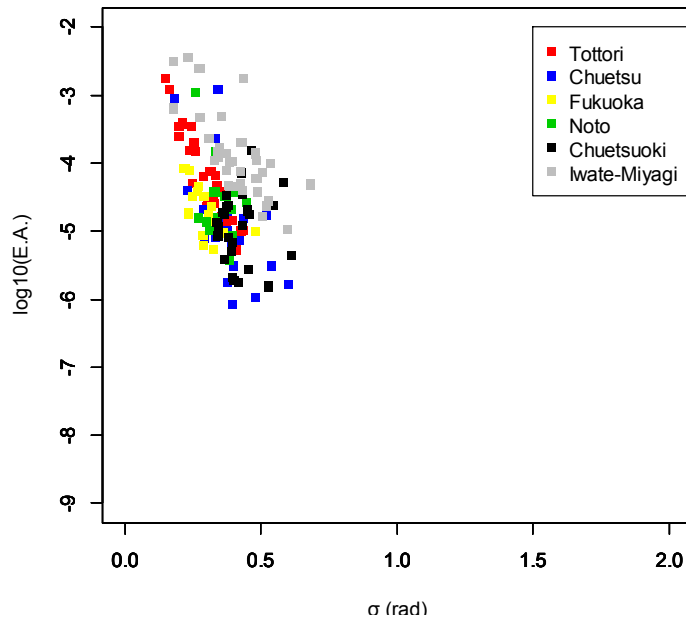


Fig.4.59: relation of σ and $E.A.$ in crustal earthquakes in 0.1 – 10.0 Hz

4.5.2 プレート境界地震

Fig.4.60 にプレート境界地震全体の 0.1 – 1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係のプロットを示す. 直下型地震と同様, 堆積層上のサイトのデータを含むためばらつきが大きい. これらのデータを除くと Fig.4.61 のようになる. また Fig.4.62 に堆積層上のサイトの結果をまとめた. Fig.4.61 では同程度の $E.A.$ に対して 2005 年宮城県沖地震の σ が最小で, 2003 年十勝沖地震, 2011 年三陸沖地震の順に σ が大きくなる. 2005 年宮城県沖地震と 2003 年十勝沖地震は震源深さは同程度だがマグニチュードは後者の方が大きい. また 2005 年宮城県沖地震と 2011 年三陸沖地震はマグニチュードはほぼ等しいが後者の方が震源が浅い. マグニチュードが大きい地震の方が震源が浅い地震の方が σ が大きいという傾向は石井・渡辺 (1987) ¹⁾ も指摘している. Fig.4.61 と同じ大小関係が堆積層上のサイトを対象にした Fig.4.62 についても当てはまる.

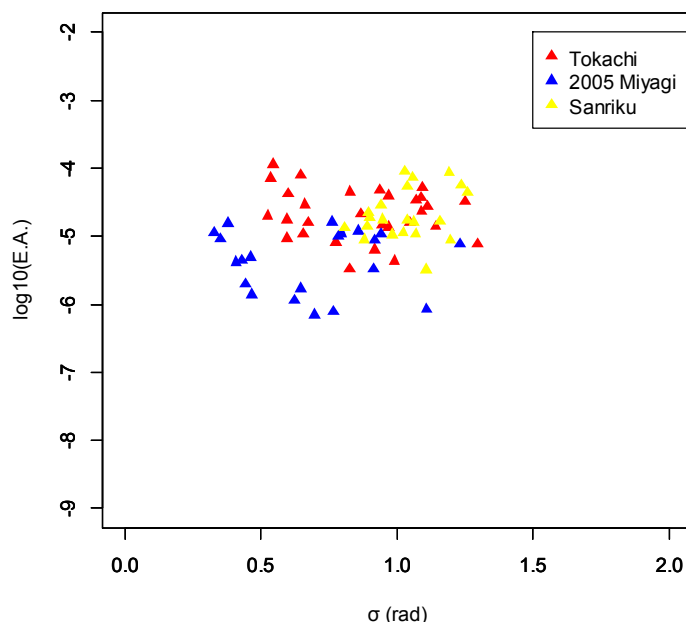


Fig.4.60: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz (all data considered)

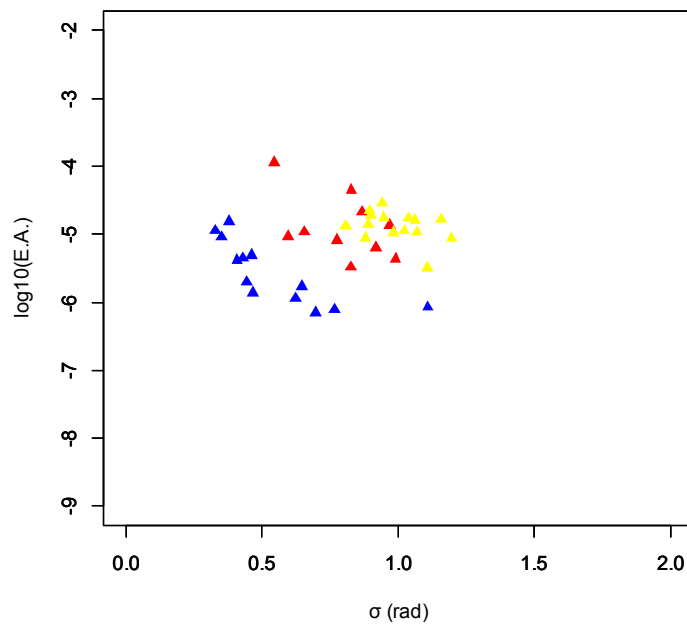


Fig.4.61: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz

(sites where bedrock are located more than 450 m from the ground surface are eliminated)

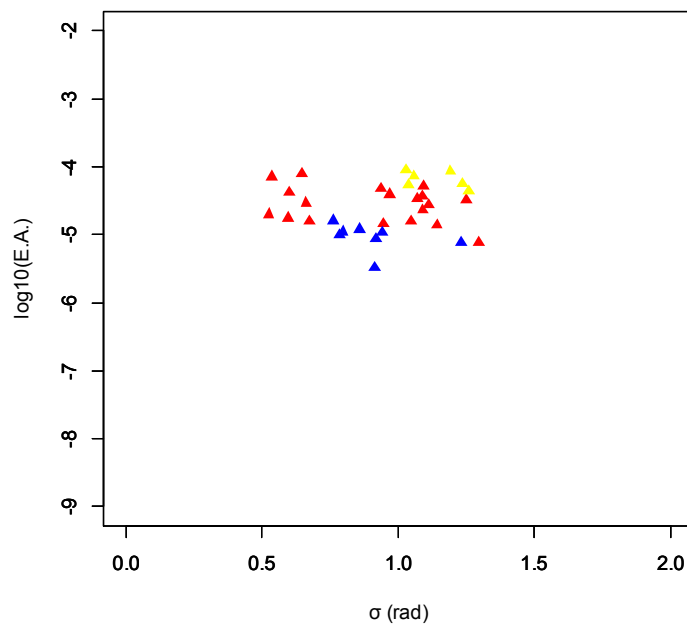


Fig.4.62: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz

(only sites where bedrock are located more than 450 m from the ground surface are included)

その他の帯域における結果を Fig.4.63～ Fig.4.67 にそれぞれ示す. Fig.4.63 を見ると 1.0 - 2.0 Hz においても同程度の $E.A.$ に対してマグニチュードがより大きい 2003 年十勝沖地震, あるいはより震源が浅い 2011 年三陸沖地震の σ の方が 2005 年宮城県沖地震の σ より大きい. 2.0 - 3.0 Hz においてはマグニチュードが異なる 2003 年十勝沖地震と 2005 年宮城県沖地震の結果はほぼ重なっているが, 深さの異なる 2005 年宮城県沖地震と 2011 年三陸沖地震の差は依然として存在する. このことから σ と $E.A.$ の関係においてはマグニチュードより震源深さの方が強い影響を持っていると示唆される. しかしそれ以上の高周波数帯域では三者の差は縮まる.

帯域の差に着目すると, 直下型地震の時と同様に高周波数になるほど σ と $E.A.$ の勾配は増大する. またプレート境界地震の σ と $E.A.$ の勾配は全体的に直下型地震より緩い.

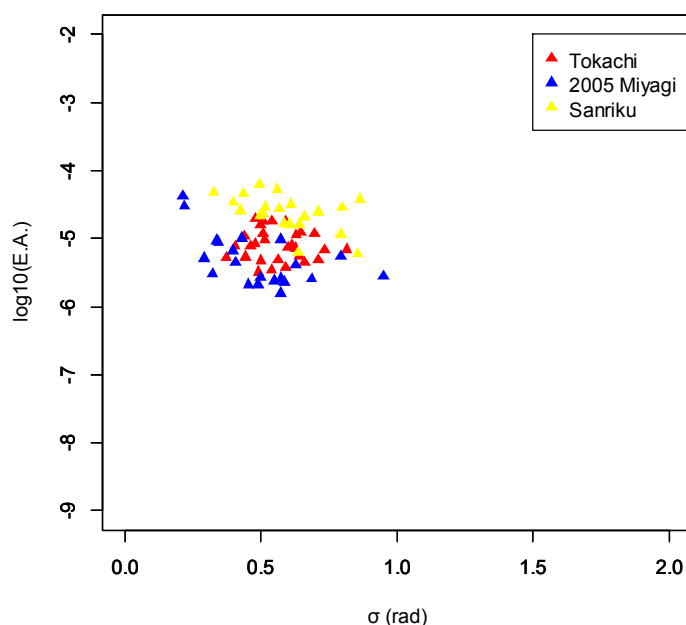


Fig.4.63: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 1.0 - 2.0 Hz

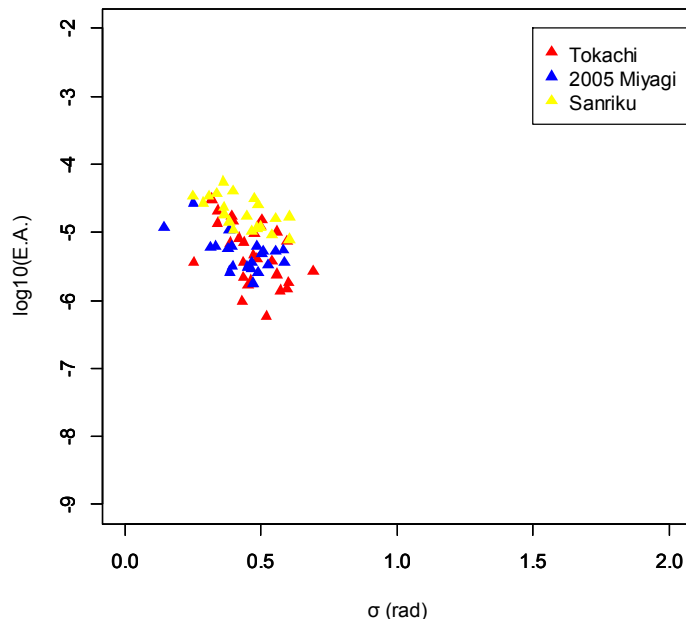


Fig.4.64: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 2.0 – 3.0 Hz

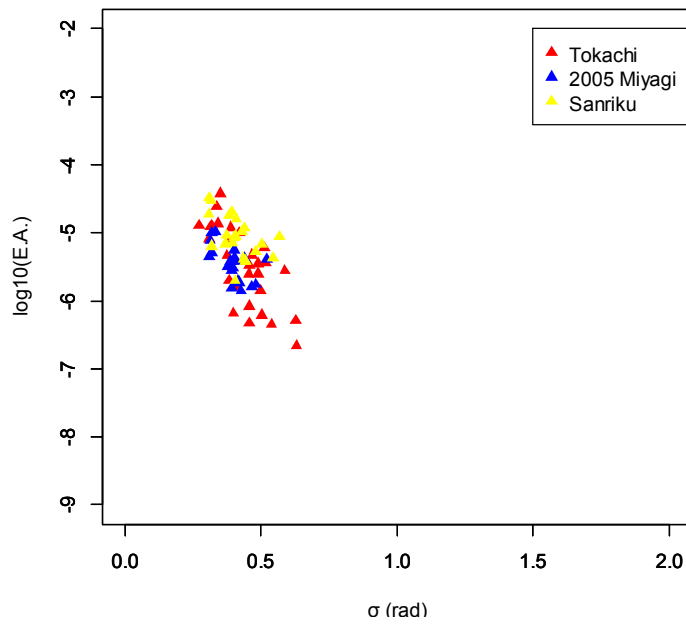


Fig.4.65: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 3.0 – 5.0 Hz

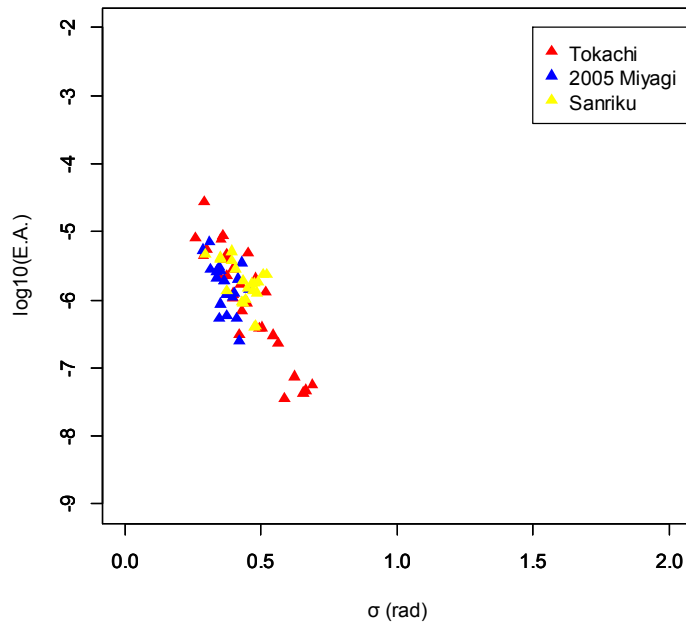


Fig.4.66: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 5.0 – 10.0 Hz

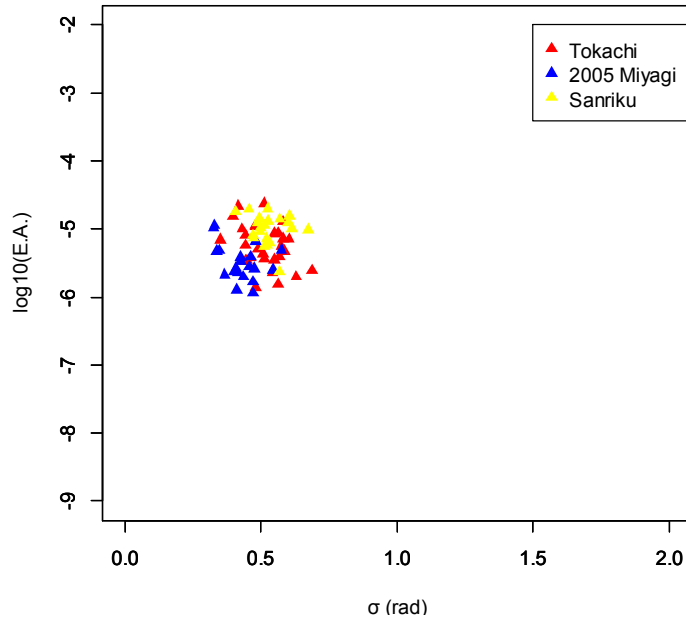


Fig.4.67: relation of σ and $E.A.$ in interface earthquakes in 0.1 – 10.0 Hz

4.5.3 スラブ内地震

Fig.4.68 にスラブ内地震全体の $0.1 - 1.0$ Hz における σ と $E.A.$ の関係のプロットを示す. ここにも堆積層の上に位置するサイトの結果が含まれている. これらのデータを除いて再びデータを整理すると Fig.4.69 のようになる. また Fig.4.70 に堆積層の影響を含んだデータをまとめた. Fig.4.69 を見るとスラブ内地震においても震源深さの違いによると思われる σ の違いが認められ, 例えば $E.A.$ が 10^{-5} 程度で σ は 2001 年岩手県内陸南部地震 (深さ 122 km) が一番小さく, 2009 年駿河湾の地震 (深さ 23 km) が一番大きい. 深さがそれぞれ 51 km と 70 km の 2001 年芸予地震と 2003 年宮城県沖地震の σ は中間の位置にある. 一方 Fig.4.70 を見るとここでも同程度の $E.A.$ に対して震源が浅い 2003 年宮城県沖地震の σ の方が, 2001 年岩手県内陸南部地震の σ より大きい. しかしながら最も震源が浅い 2009 年駿河湾の地震と 2003 年宮城県沖地震のプロットはほぼ重なっている. (ただし 2009 年駿河湾の地震における堆積層上の観測点の多くは Group 1 や Group 2, すなわち $E.A.$ が小さくなりやすいものに分類されている. 一方 2001 年岩手県内陸南部地震と 2003 年宮城県沖地震における堆積層上の観測点の多くは Group 5 や Group 6, $E.A.$ が小さくならないものと分類されている.)

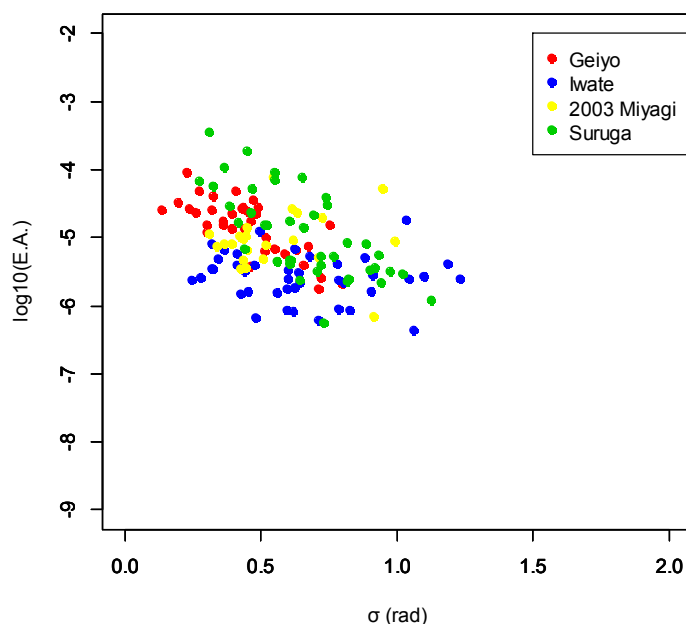


Fig.4.68: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in $0.1 - 1.0$ Hz (all data considered)

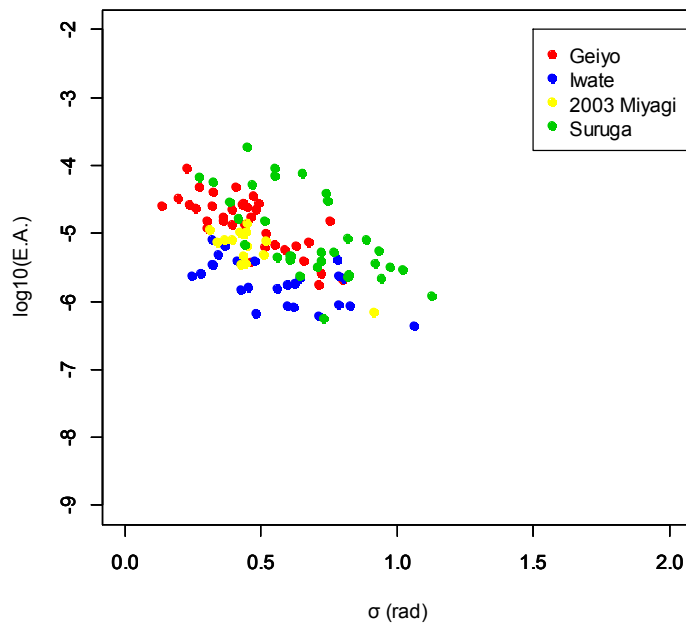


Fig.4.69: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz

(sites where bedrock are located more than 450 m from the ground surface are eliminated)

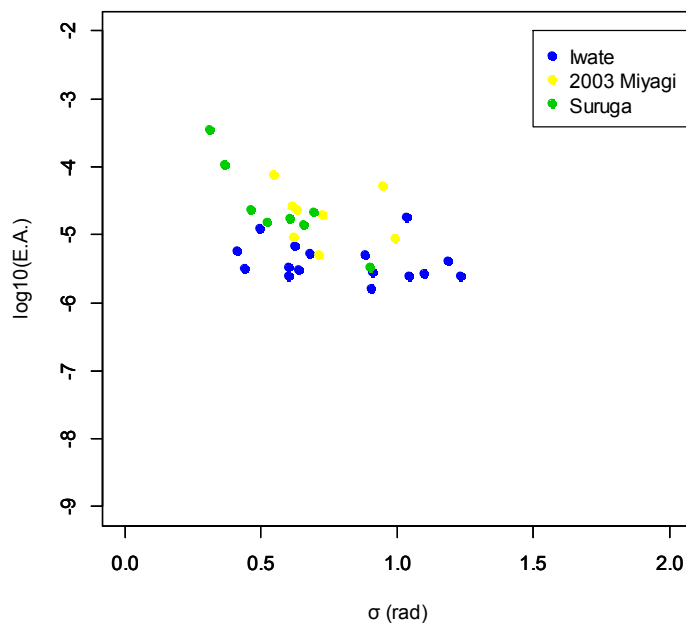


Fig.4.70: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in 0.1 – 1.0 Hz

(only sites where bedrock are located more than 450 m from the ground surface are included)

他の帯域における結果を Fig.4.71～Fig.4.75 にそれぞれ示す. Fig.4.71 を見ると 1.0 - 2.0 Hz でも僅かに震源深さの違いによると思われる σ の差が見られるものの, 0.1 - 1.0 Hz における地震間の差より小さくなっている. それより高周波数帯域に行くと地震間の差はほぼない.

帯域の差に着目すると直下型地震・プレート境界地震の結果と同様に, 高周波数になるほど σ と $E.A.$ の勾配は増大する. またスラブ内地震の σ と $E.A.$ の勾配は全体として直下型地震のそれとほぼ同程度である.

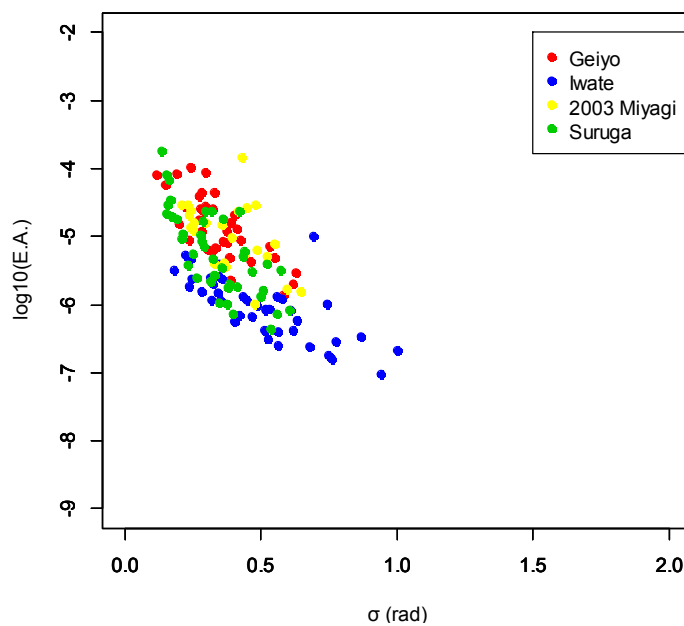


Fig.4.71: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in 1.0 - 2.0 Hz

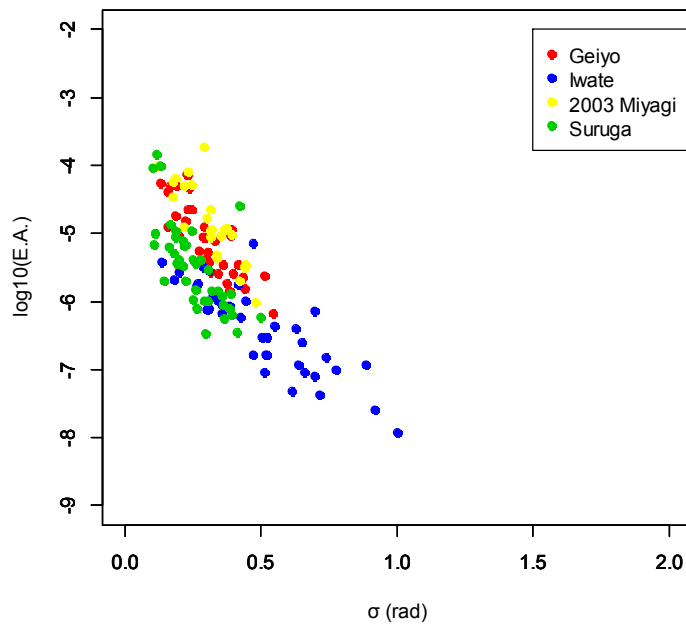


Fig.4.72: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in 2.0 – 3.0 Hz

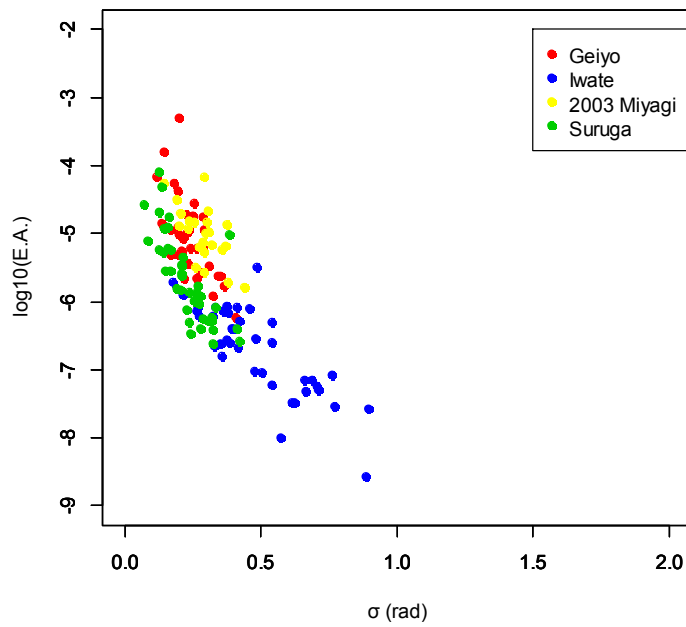


Fig.4.73: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in 3.0 – 5.0 Hz

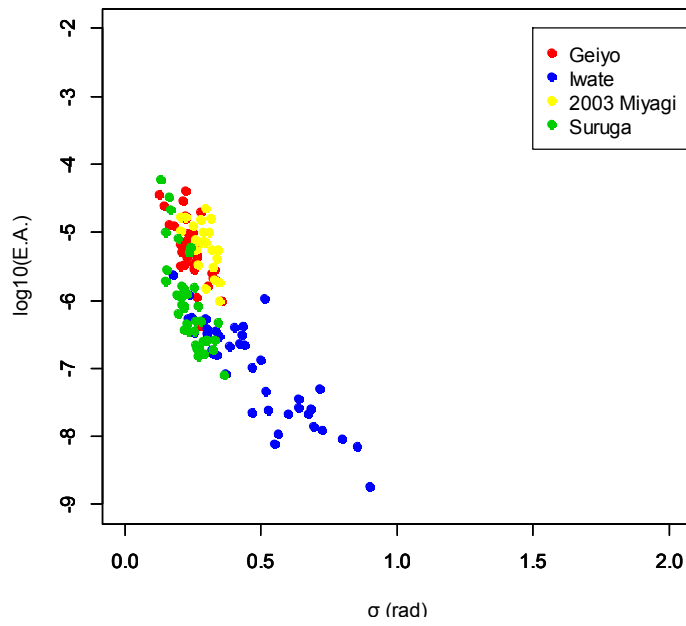


Fig 4.74: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in 5.0 – 10.0 Hz

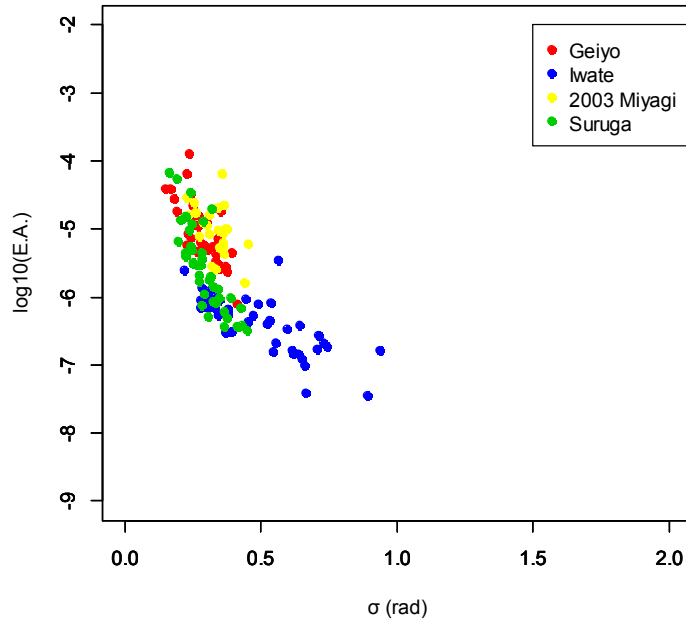


Fig 4.75: relation of σ and $E.A.$ in intraplate earthquakes in 0.1 – 10.0 Hz

以上三タイプの地震について結果をまとめた。得られた知見としてはプレート境界とスラブ内について 0.1–1.0 Hz における σ と $E.A.$ の関係は地震の規模や深さに影響を受けやすい、1.0 Hz 以上の帯域ではこれらの要因による影響は低減する（プレート境界地震では 3.0 Hz 程度まで比較的差が見られる）、地震のタイプ毎に σ と $E.A.$ の勾配は異なる、高周波数に行くほど σ と $E.A.$ の勾配は急になる、などである。本論文で検討した直下型地震はいずれもマグニチュードや深さが類似しているため、低周波数帯域におけるこれらの影響は論じられない。

4.6 まとめ

本章では位相差分の標準偏差 σ の推定方法を議論した。従来の研究では震央距離か震源距離で σ を説明しているが、本章では必ずしも σ が距離だけで説明できるわけでないことを指摘した。そして震源からのエネルギー減衰 $E.A.$ で σ を推定する手法を提案した。その準備段階として震源から各サイトに至るまでの平均的な減衰率に応じてサイトをグルーピングした。

検討した結果、高周波数になるほど σ と $E.A.$ の勾配が増すこと、0.1–1.0 Hz においては Group 間のプロットが著しくずれている地震（例えば 2004 年新潟県中越地震など）があること、一般に高周波数帯域においては Group 間の差が小さくなることを示した。

また補足として 0.1–1.0 Hz において σ と $E.A.$ の関係がばらついている地震について検討した。その結果、堆積層の上に位置しせん断波速度が 2000 m/s を超える硬質な基盤が地表から 450 m 以上の深さにある堆積層上のサイトでは、全体的に「高 σ ・高 $E.A.$ 」となることに触れた。

最後に地震のメカニズム毎に各地震の結果を重ねて整理した。検討した 6 つの直下型地震は震源がどれも浅く、 M_w も 6.6 から 6.9 の間に収まっており、どの帯域においても 2008 年岩手・宮城内陸地震を除く 5 地震の σ と $E.A.$ のプロットは概ねある線上に乗っている。それに対してプレート境界地震ではマグニチュードがより大きいもしくは震源深さがより浅い地震が、低周波数帯域においては同程度の $E.A.$ に対して大きい σ を取ることを指摘した。同様の傾向はスラブ内地震にも当てはまる。しかしながらマグニチュードや深さについてより系統だった議論するにはさらに多くの地震を解析する必要がある。地震タイプ毎の傾向の差を比較すると、 σ と $E.A.$ の勾配が一番緩いのはプレート境界地震で、直下型地震とスラブ内地震の勾配は同程度である。

本章における結果は第六章の波形シミュレーションにおいて利用する。

第四章の参考文献

- 1) 石井透, 渡辺孝英：地震動の位相特性と地震のマグニチュード・震源距離・深さとの関係, 日本建築学会学術講演梗概集 B, 構造 I, pp. 385–386, 1987.
- 2) 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.
- 3) 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) Novikova, E.I., M.I. Todorovska and M.D. Trifunac (1993), “A preliminary study of the duration of strong earthquake ground motion on the territory of former Yugoslavia”, Report No. CE 93-09, University of Southern California.
- 5) Boore, D.M. (1983), “Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra”, *Bull. Seism Soc Am*, **73**, pp.1865 – 1894.
- 6) 佐藤智美: 統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰特性, 日本地震工学会論文集, 第 7 巻, 第 6 号, 2007.
- 7) 中村亮一: 短周期地震動記録に基づく日本列島下の三次元減衰構造 Q_s ・震源スペクトル・地盤増幅の同時インバージョンとその応用, 東京大学 学位論文, 2009.
- 8) 佐藤智美: スペクトルインバージョンと経験的グリーン関数法に基づく 2009 年駿河湾の地震の震源のモデル化, Japan Geoscience Union Meeting, 2010.
- 9) 菊地正幸: リアルタイム地震学, 東京大学出版会, 2003.
- 10) J-SHIS 地震ハザードステーション, www.j-shis.bosai.go.jp/
- 11) 西川孝夫, 荒川利治, 久田嘉章, 曾田五月也, 藤堂正喜, 山村一繁: 建築の振動 応用編, 朝倉書店, 2008.

5. 位相差分とフーリエ振幅の関係のさらなる考察

著者は既に第三章で位相差分の外れ値について論じ、位相差分が平均から離れた値を取る周波数においてはフーリエ振幅が非常に小さくなっていることを定量的に示した。それではさらに一般的に、位相差分とフーリエ振幅の間にはどのような関係があるのだろうか。実際の地震動シミュレーションを行う前にこのことを検討した。

5.1 いくつかの波形についての検討例

まず本論文で検討した地震波形の中からランダムに9波を選び出し、帯域 0.1 – 10.0 Hz に含まれる位相差分とフーリエ振幅の関係を調べた。Fig.5.1 に選択した9の地震波形（帯域 0.1 – 10.0 Hz の成分のみ含む、フィルター済みの波形）を示す。パルス状の大振幅を持つものから、振幅が十分に減衰して、継続時間が長くなっているものまで様々である。

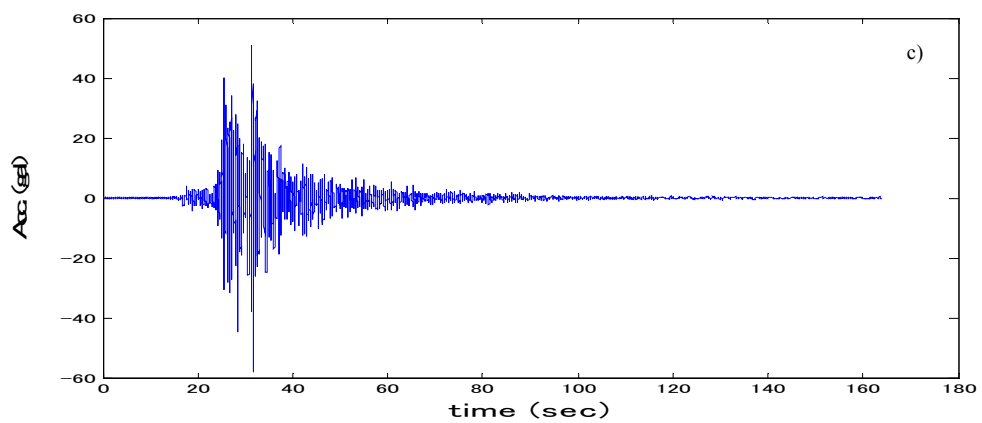
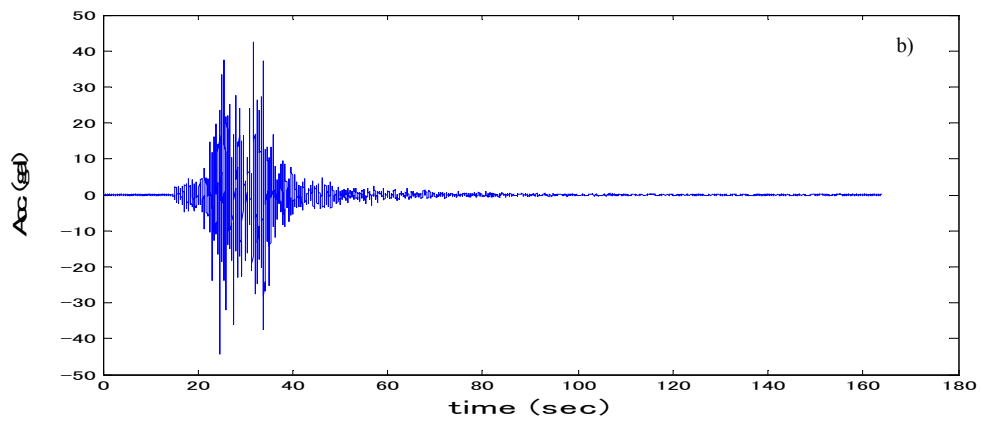
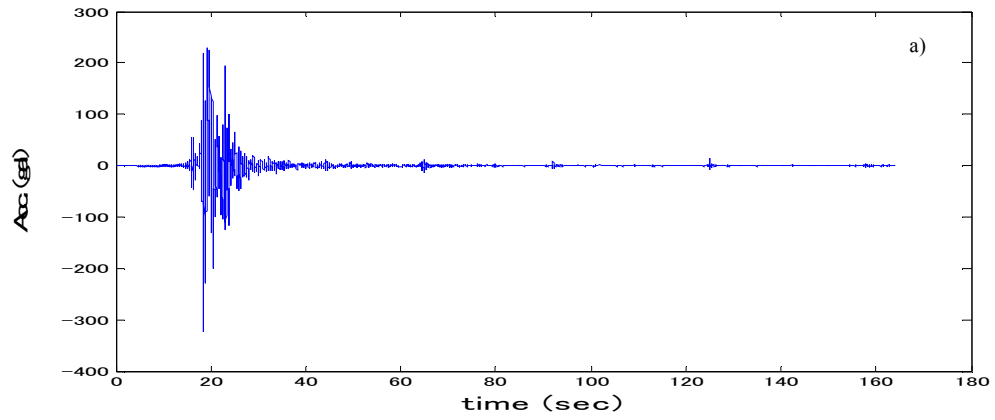
Fig.5.2 にそれぞれの波形について、帯域 0.1 – 10.0 Hz に含まれる位相差分とフーリエ振幅の散布図を示す。ここで注意が必要なのは、第三章でも述べたように位相差分とフーリエ振幅は一對一で対応しないため、 k 次の位相差分に対して k 次および $k+1$ 次のフーリエ振幅との関係を Fig.5.2 では見ていることである。

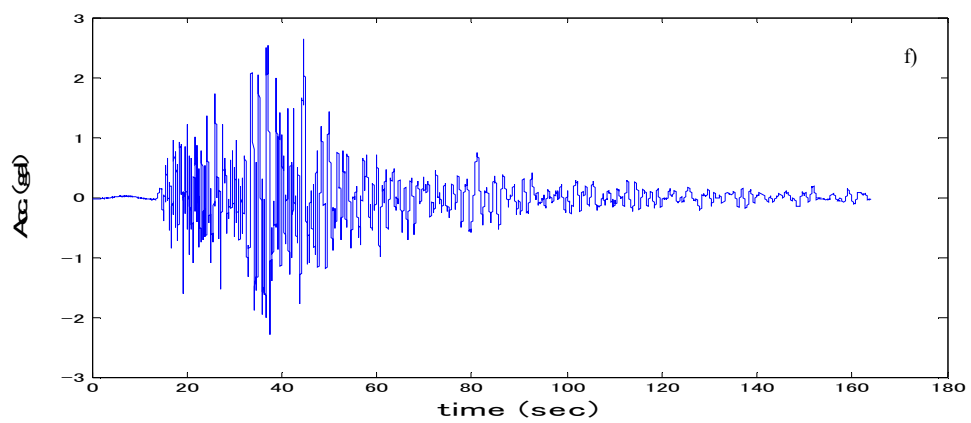
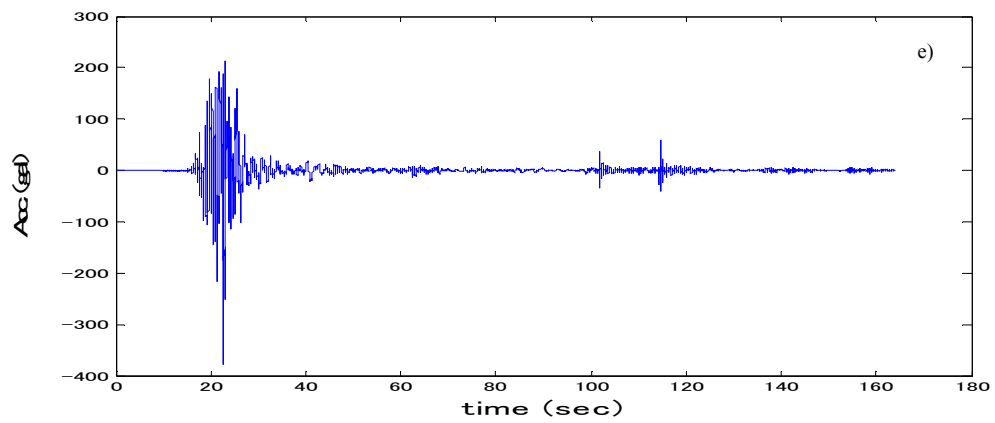
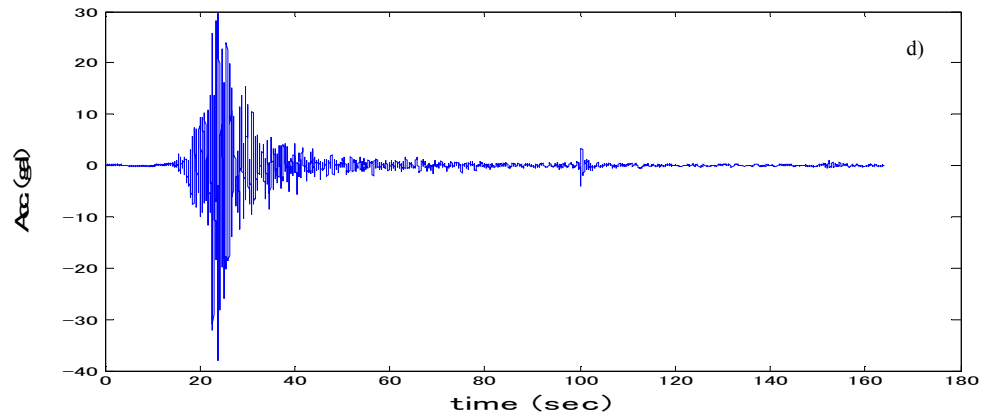
Fig.5.2 の図を見ると、位相差分とフーリエ振幅はそれぞれ無関係に存在しているのではないことが分かる。分かりやすく説明するとフーリエ振幅が小さいところでは位相差分は 0 から -2π までどの値でも取りうるが、フーリエ振幅が大きい部分を見てみると序々に取りうる位相差分の値の範囲が狭まっていく。そういった傾向は特に継続時間が短い波形において顕著である。

それでは他の周波数帯域ではどうであろうか。これについて次の検討を行った。まず Fig.5.1.a の波形の 0.1 – 1.0 Hz, 3.0 – 5.0 Hz, 5.0 – 10.0 Hz に含まれる周波数成分波を Fig.5.3 に示す。次にそれらの帯域内の位相差分とフーリエ振幅の散布図を作り Fig.5.4 に示す。

Fig.5.4 のそれぞれの図を見ると、0.1 – 10.0 Hz で検討した時と同様の傾向があることが指摘できる。

以上の検討から地震動の位相差分とフーリエ振幅の間には明瞭な関係性があることが示唆される。





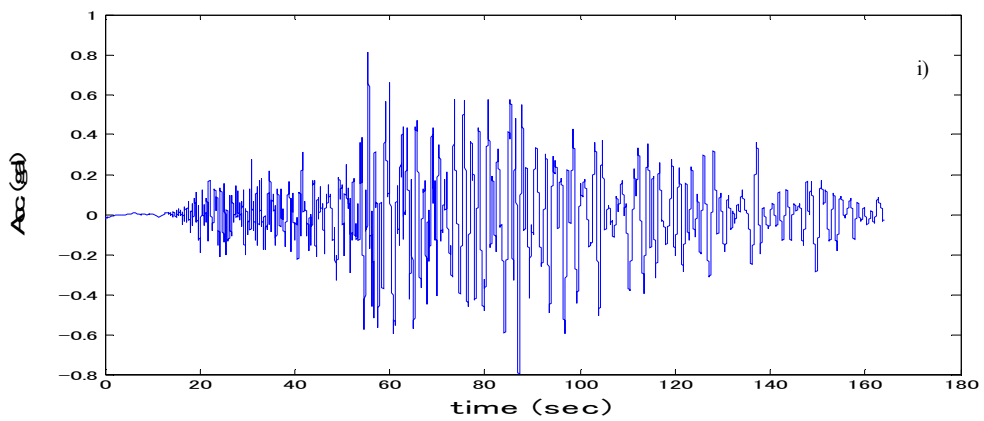
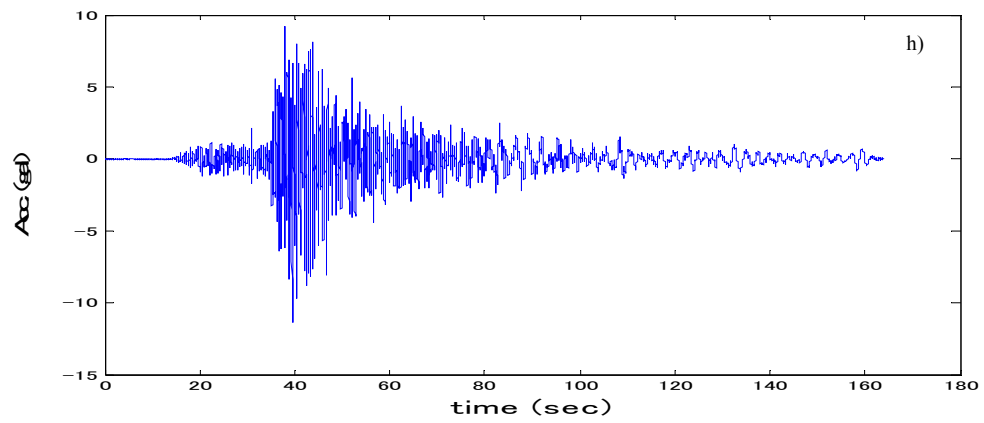
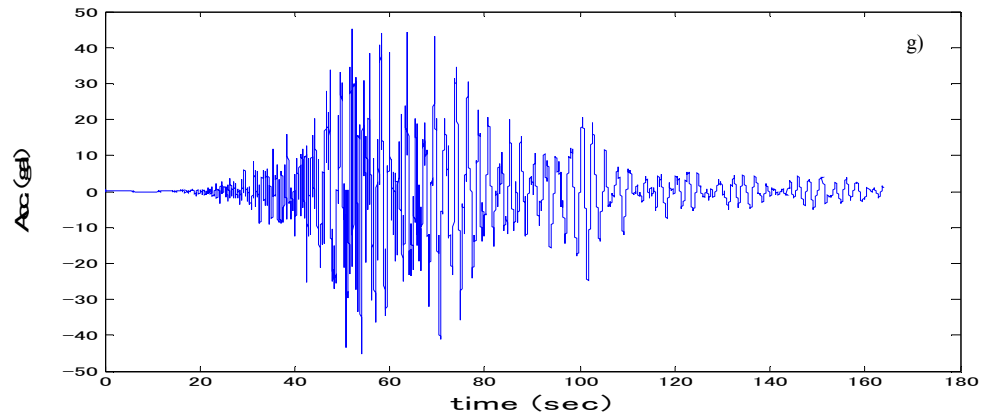
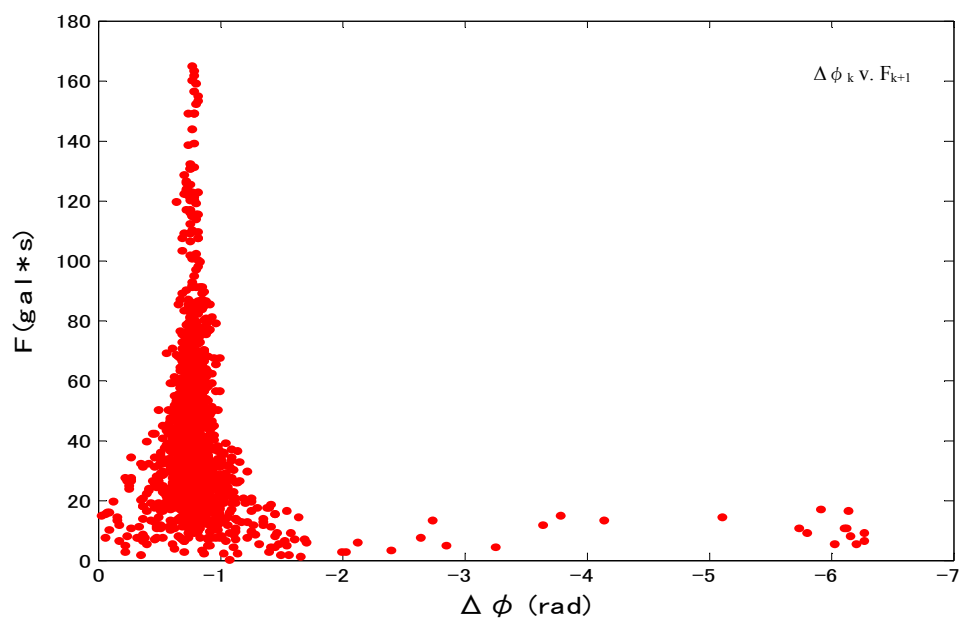
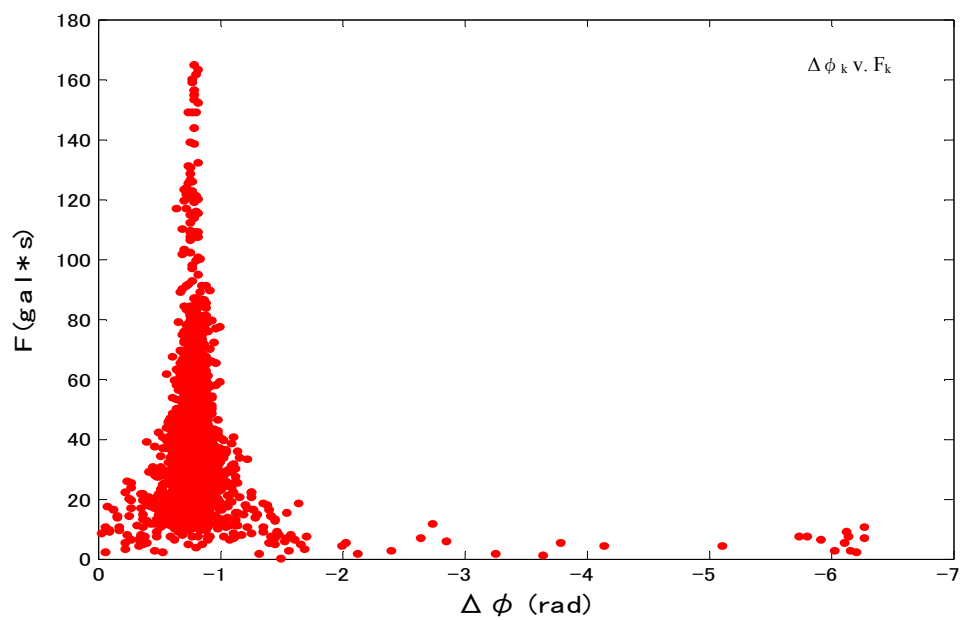
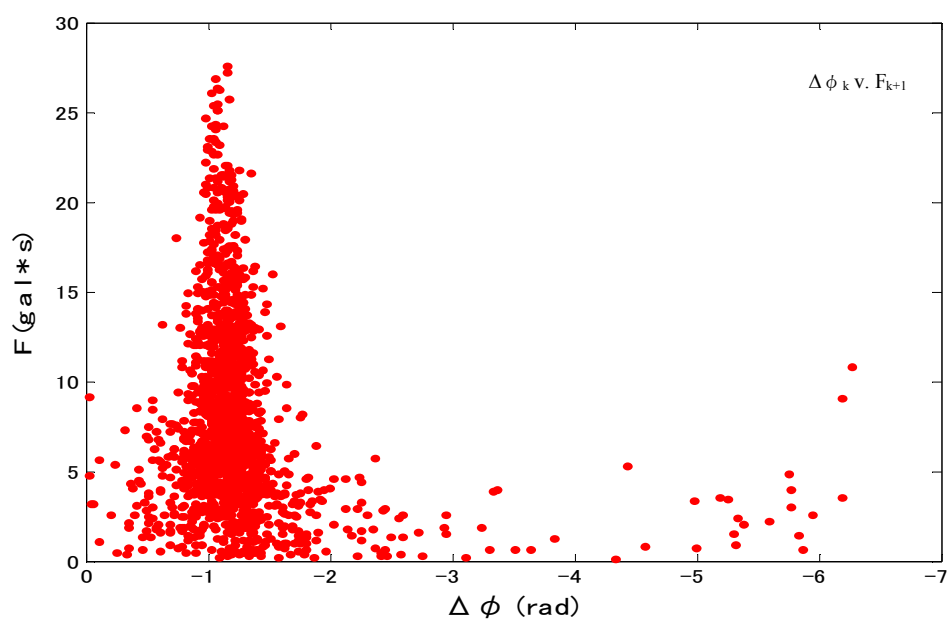
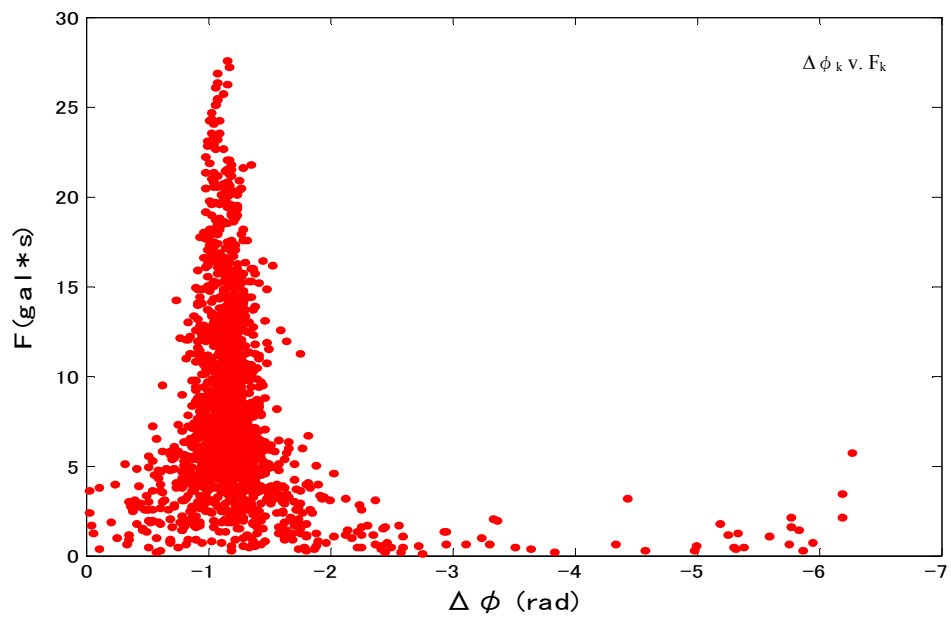


Fig.5.1: nine ground motion examples considered in this section in 0.1 – 10.0 Hz band

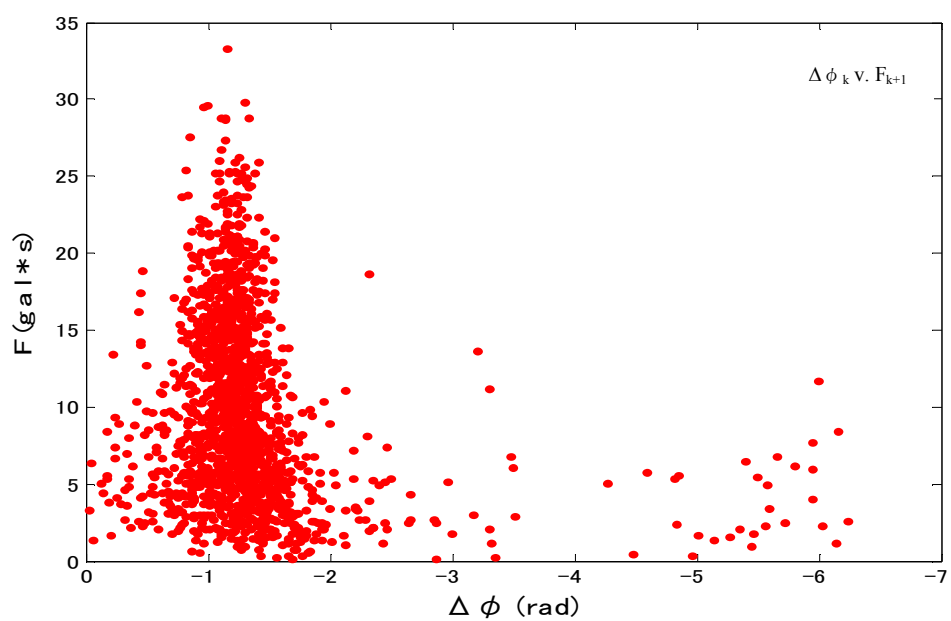
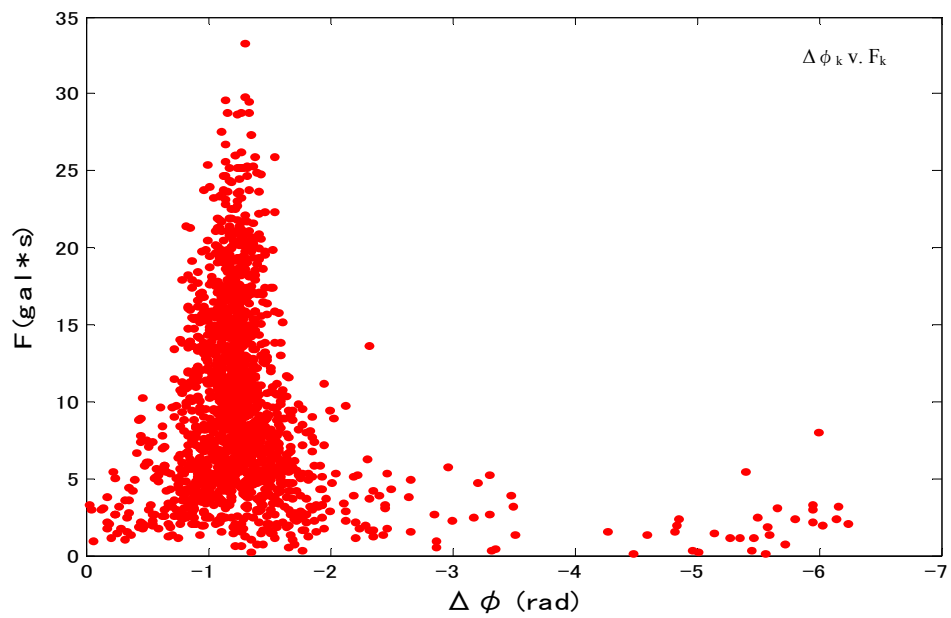
a)



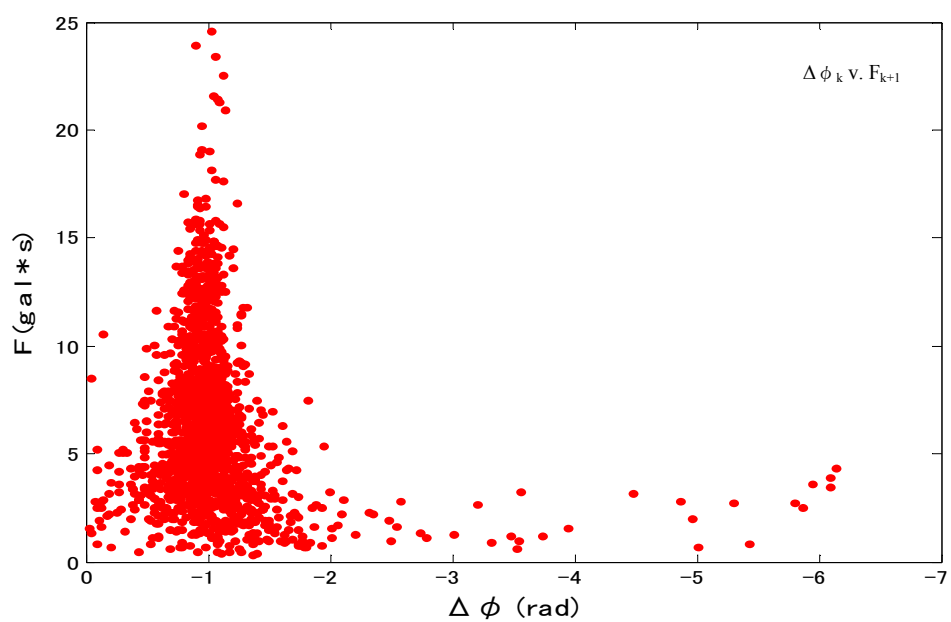
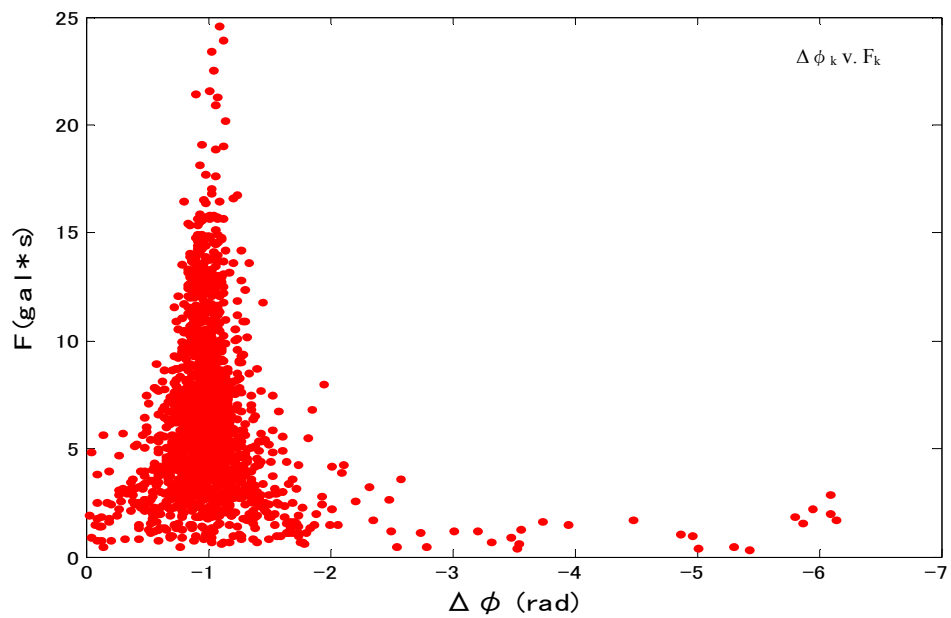
b)



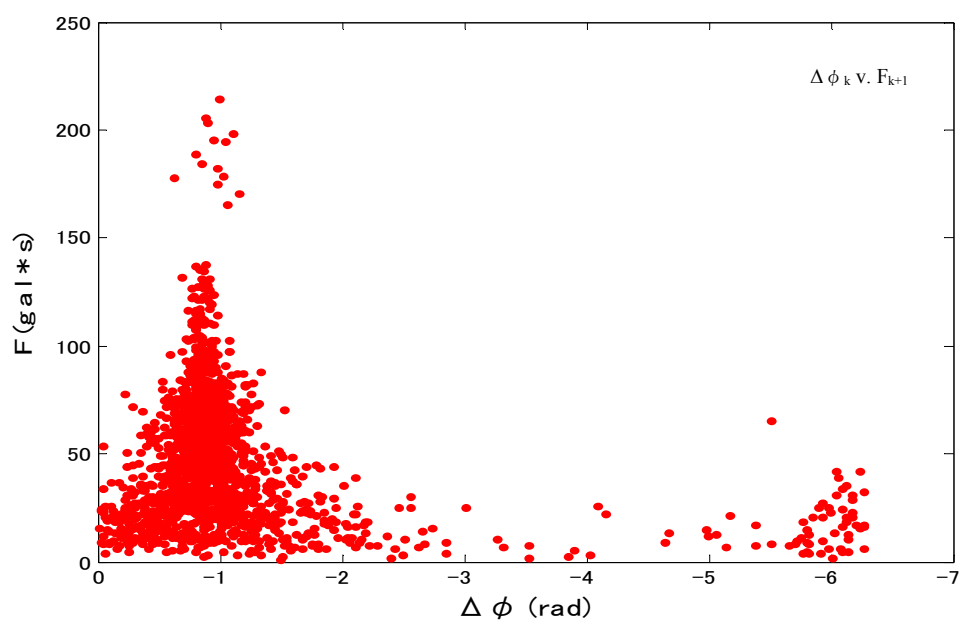
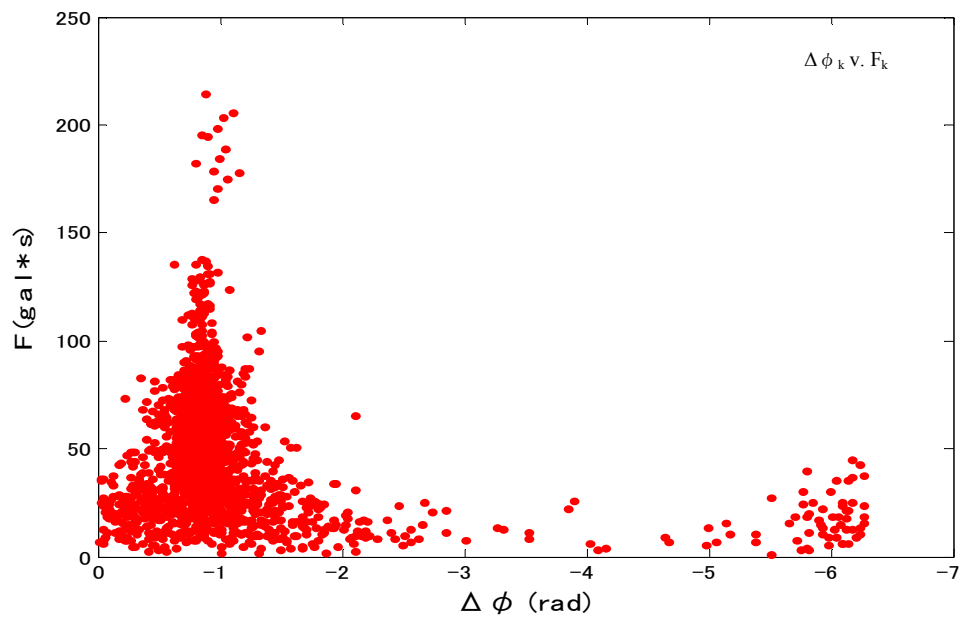
c)



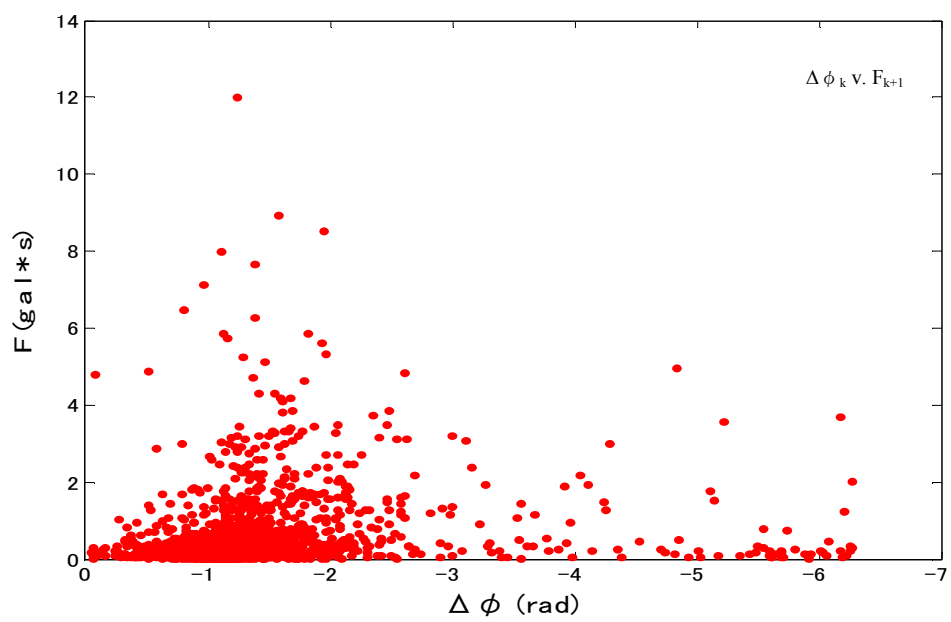
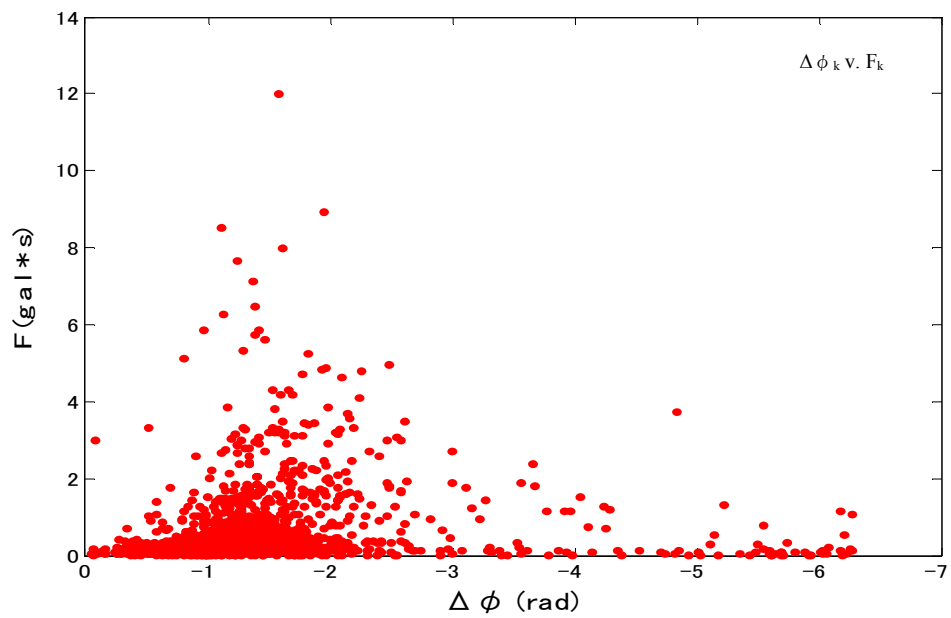
d)



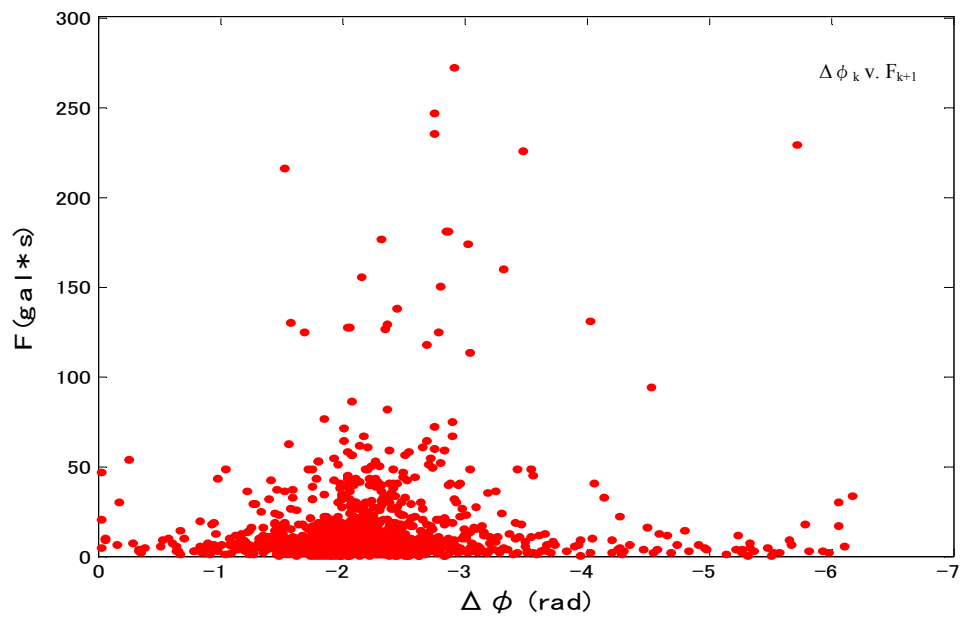
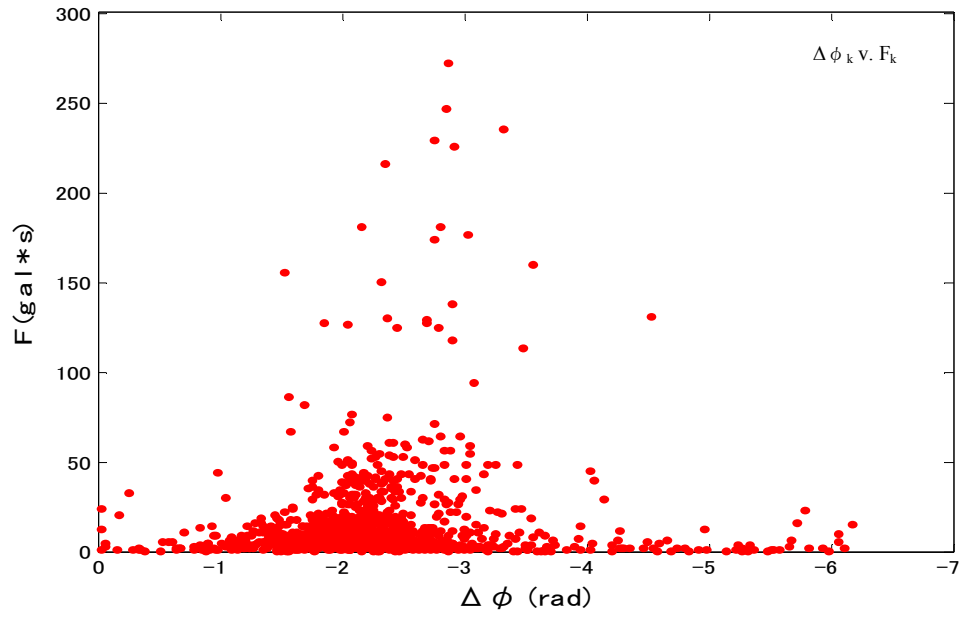
e)



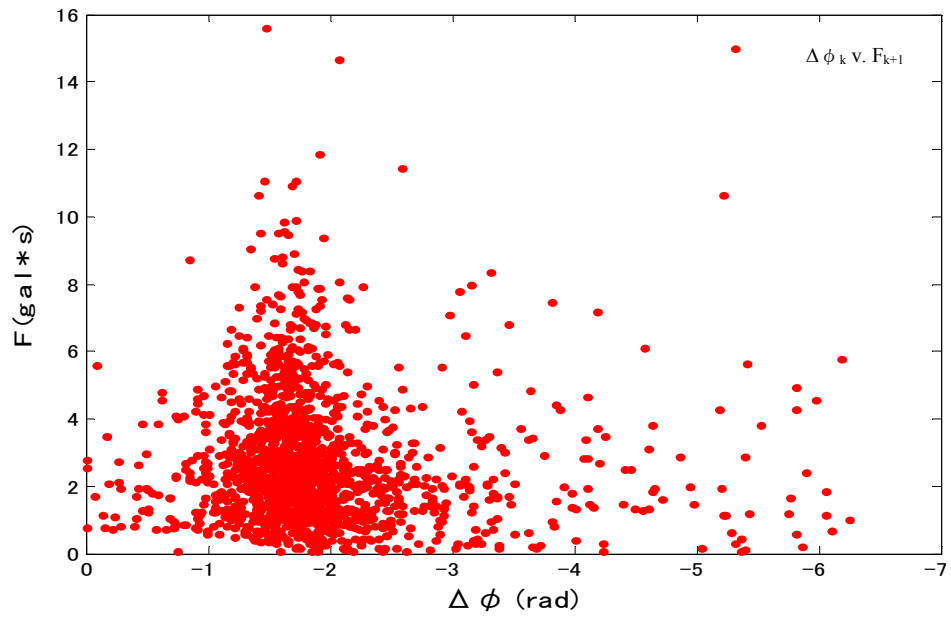
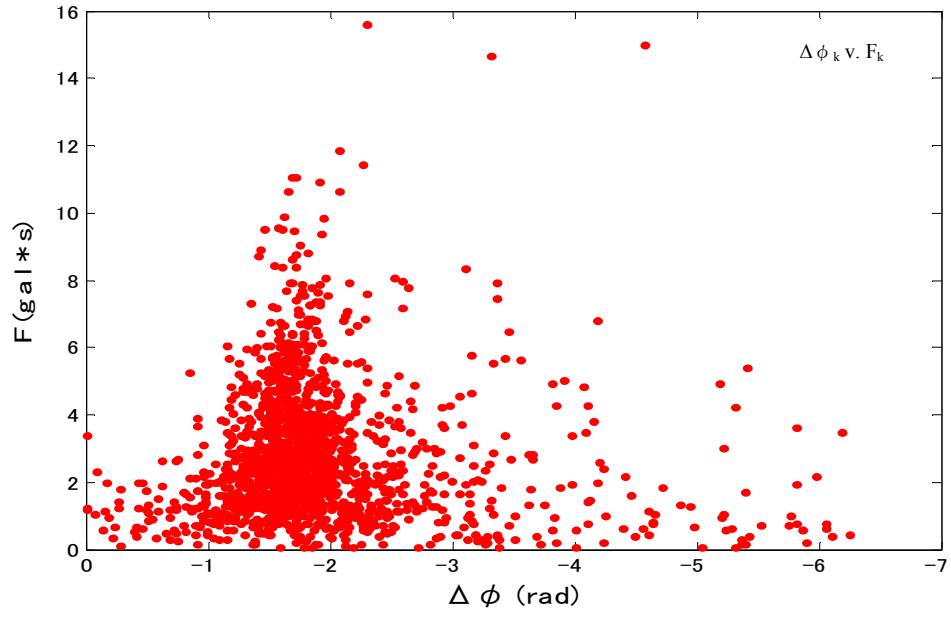
f)



g)



h)



i)

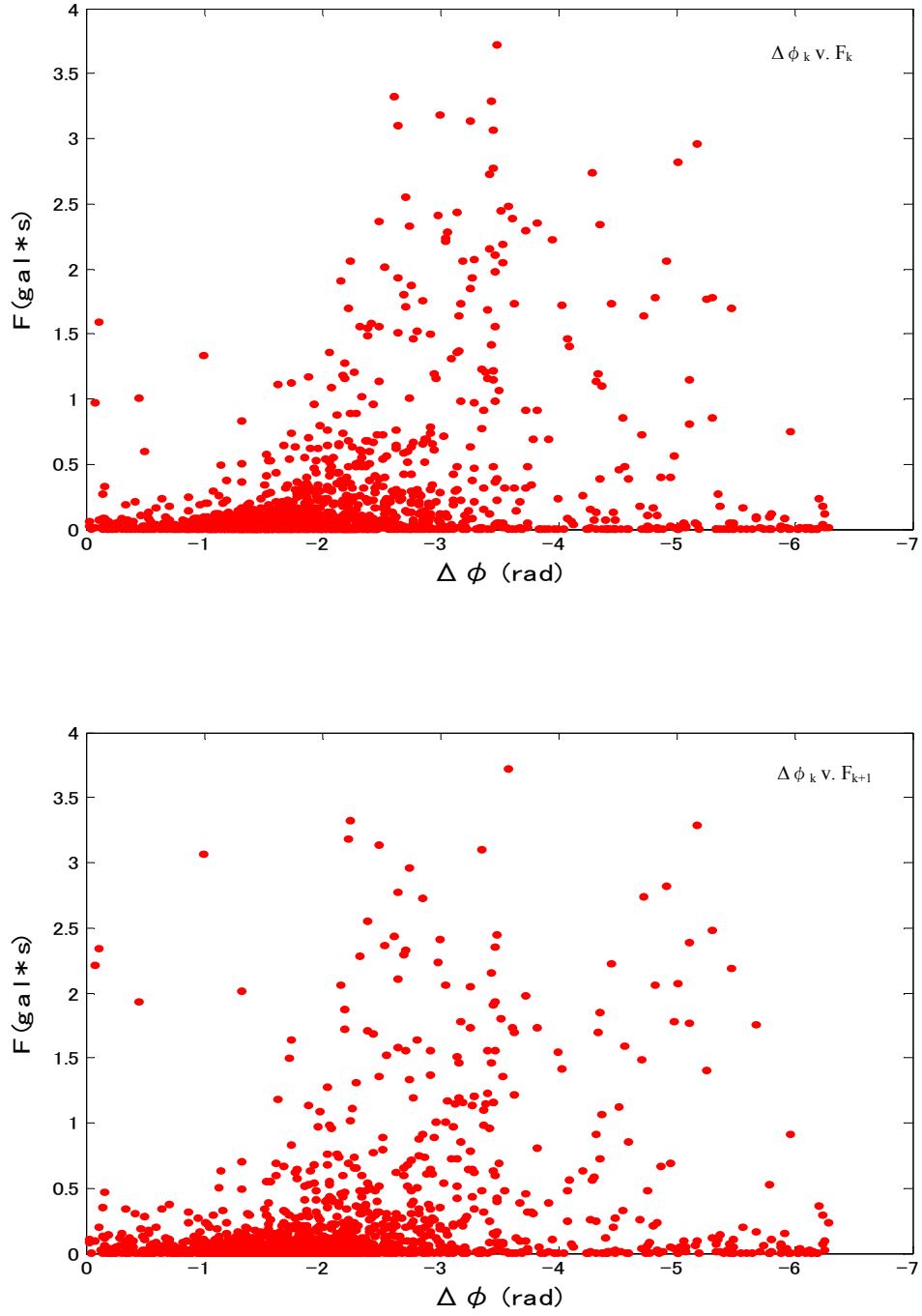


Fig.5.2: relations between phase difference and Fourier amplitude for each of ground motion cases in Fig.5.1

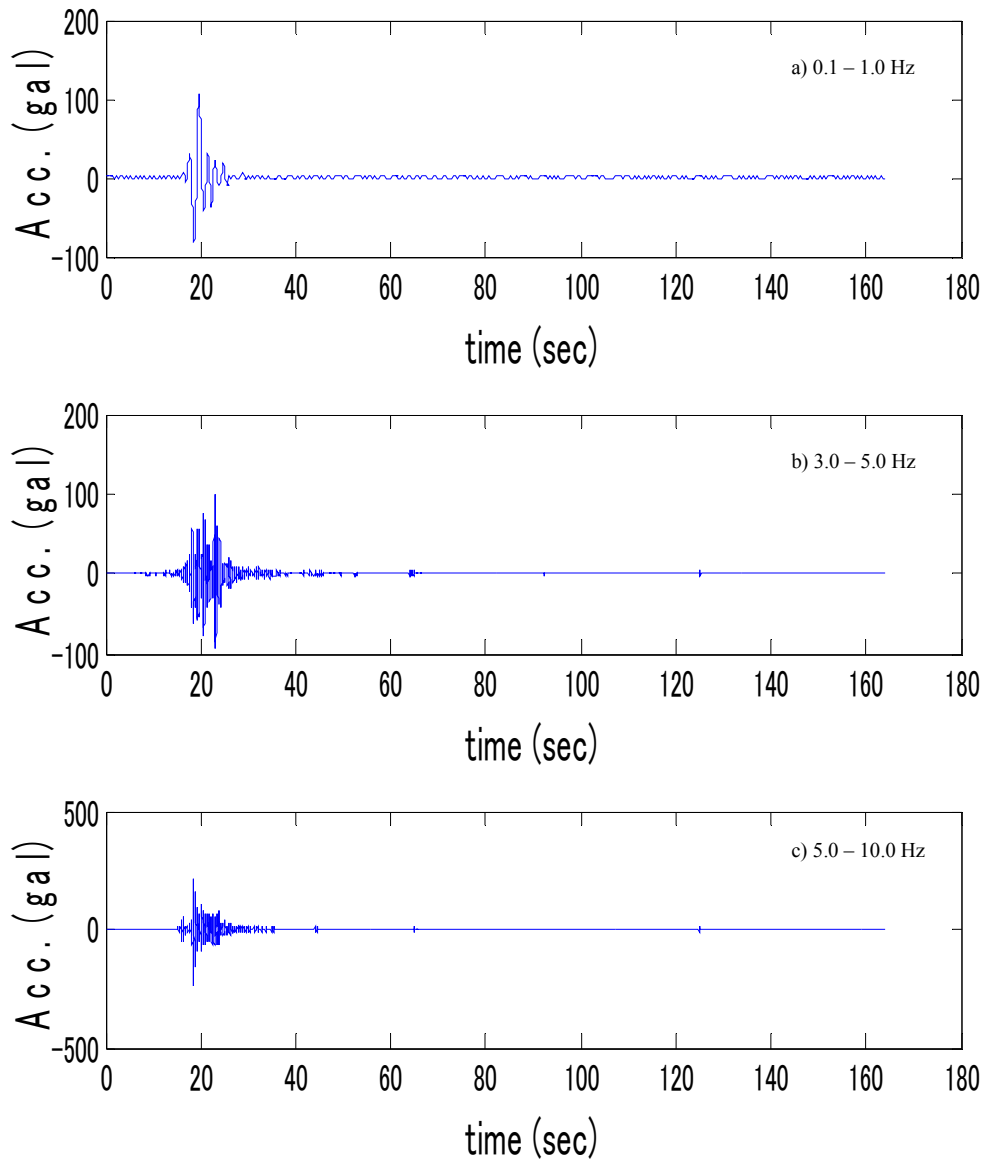
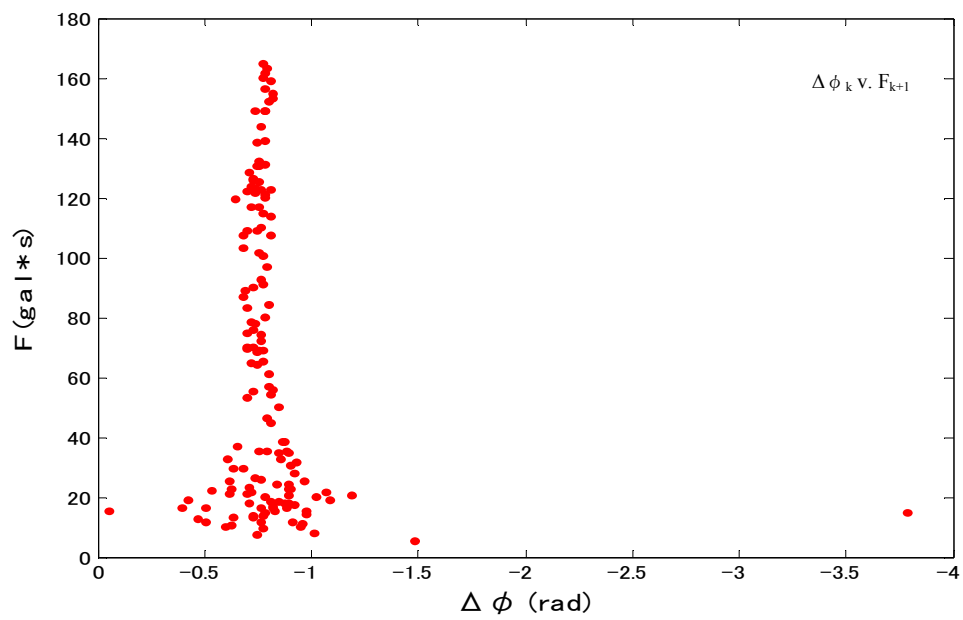
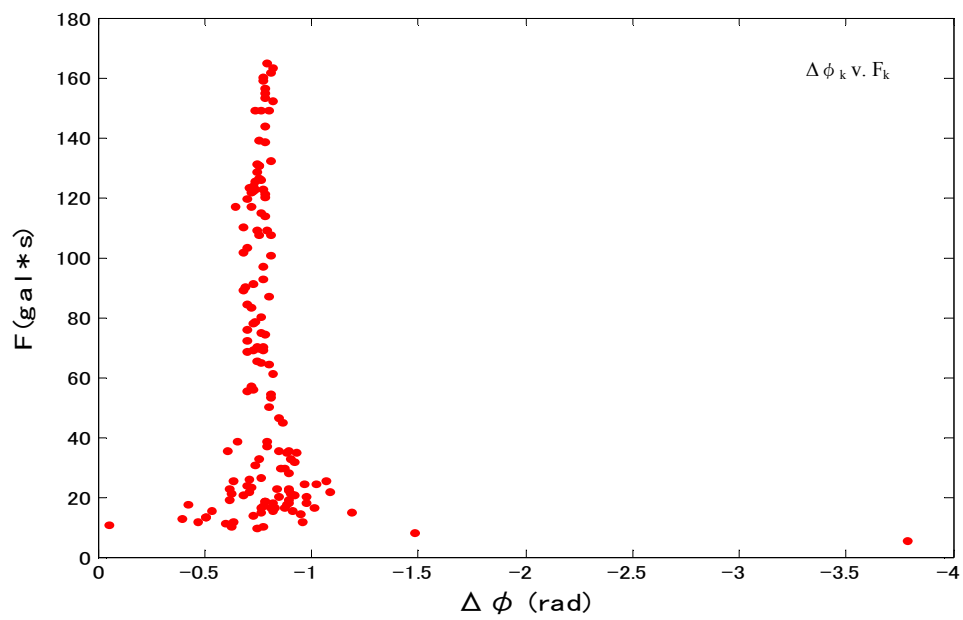
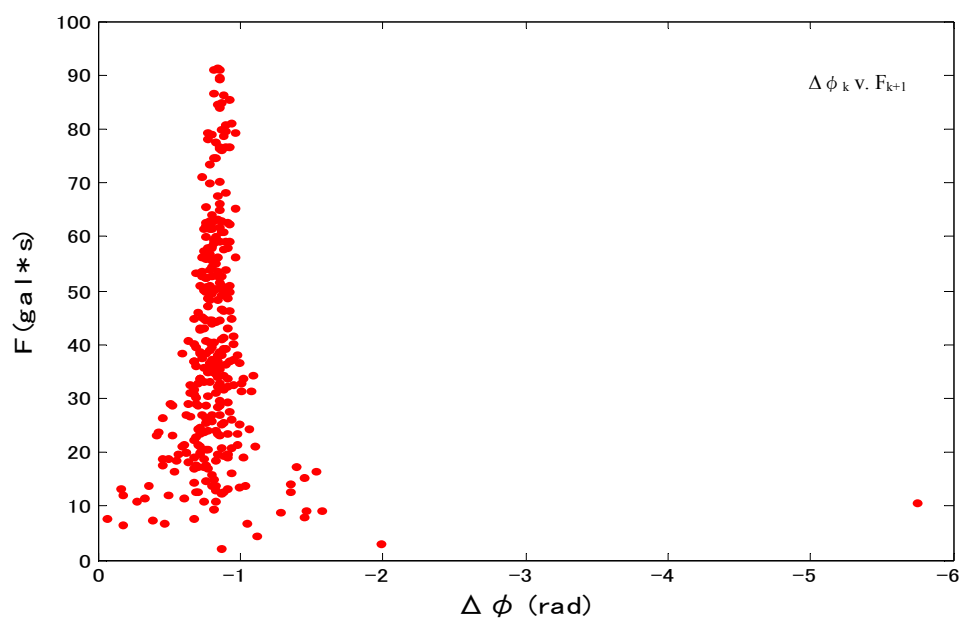
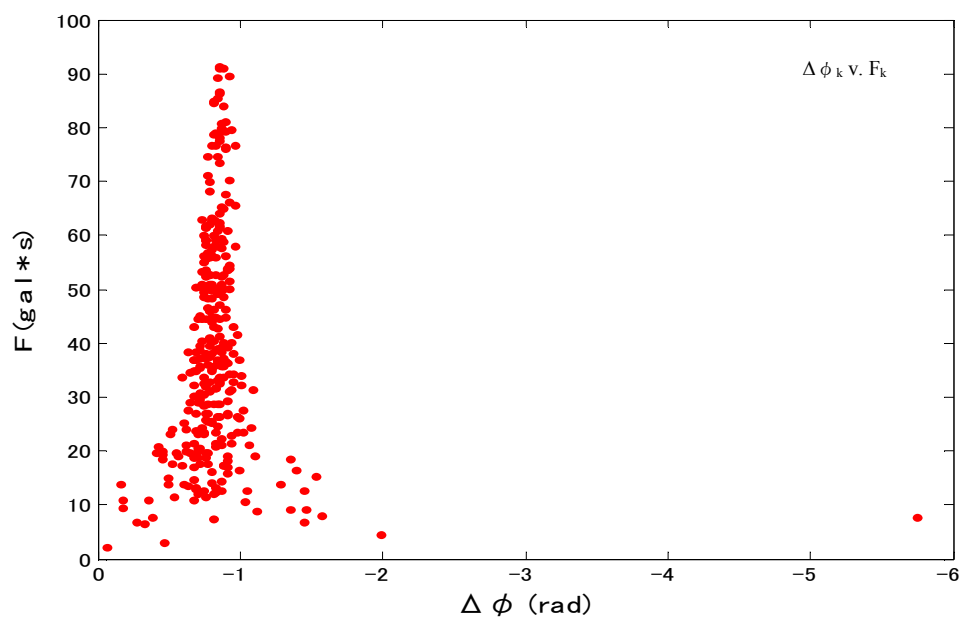


Fig.5.3: filtered ground motion cases using 0.1 – 1.0 Hz, 3.0 – 5.0 Hz and 5.0 – 10.0 Hz band filters

a) 0.1 – 1.0 Hz



b) 3.0 – 5.0 Hz



c) 5.0 – 10.0 Hz

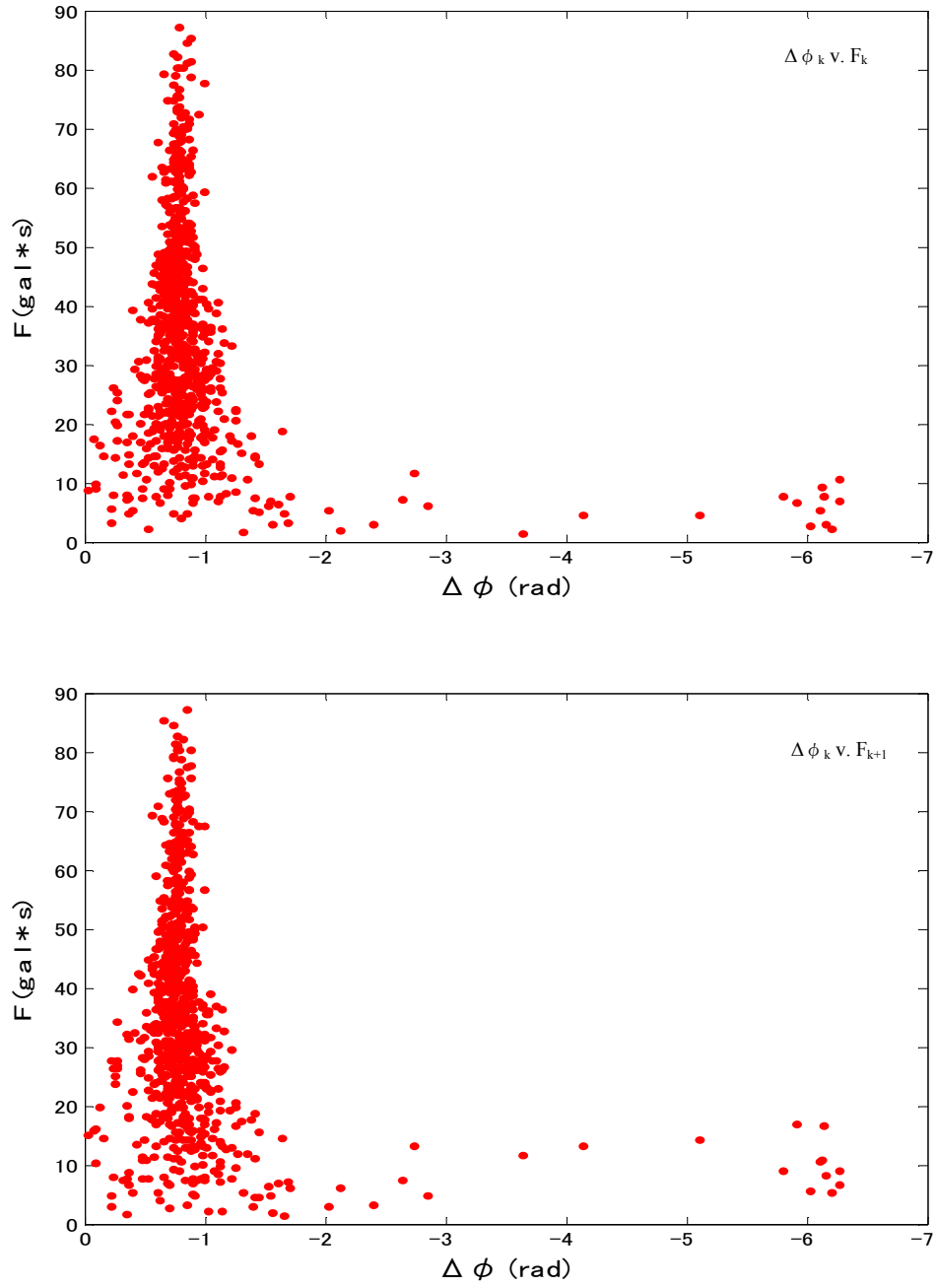


Fig.5.4: relations between phase difference and Fourier amplitude of ground motion cases in Fig.5.3

5.2 位相差分とフーリエ振幅の関係性を満足させるアルゴリズムについて

5.1 節で位相差分とフーリエ振幅の間に何らかの関係があることが示唆されると述べた。この両者の間には因果関数におけるヒルベルト変換が重要な役割を担っている。ヒルベルト変換に関する研究例をいくつか紹介すると次のようになる。

壇・他 (1986)¹⁾²⁾ は地震動を因果関数 (時間 $t < 0$ においてデータが 0 である時間関数) の一種と見なし, その最小位相推移関数 (*Minimum Phase Shift Function, MPS*) のフーリエ振幅と位相角は互いにヒルベルト変換の関係で結ばれていることを利用し, 最小位相推移関数の情報のみで地震動を再現することを試みた。その結果, 比較的小規模で破壊メカニズムが単純な地震動については最小位相推移関数で地震動を模擬できる可能性があることを示した。

白井・大町 (2005)³⁾ は, 地震動は最小位相推移関数と全域通過関数 (*All Passing Function, AP*) に因数分解できることを指摘し, 最小位相推移関数のフーリエ振幅と群遅延時間の大小関係について検討した。そしてフーリエ振幅が小さくなる周波数では, 群遅延時間の値が小さくなることを指摘している。

佐藤・他 (1999)⁴⁾ は, 和泉・他 (1990)⁵⁾ による, 基盤から地表面までの伝達関数の位相特性は最小位相推移関数と全域通過関数に分解できるという知見を踏まえて, 地盤増幅特性を最小位相推移関数に置き換えて地震動シミュレーションを試みている。

こうした既往の研究例が存在する一方で, 最小位相推移関数のフーリエ振幅と位相角の他に, 因果関数をフーリエ変換したときの実部と虚部の間にもヒルベルト変換の関係が成り立つことも知られている。Papoulis (1977)⁶⁾ は因果性を有する離散関数をフーリエ変換して得られる実部と虚部の関係を, 以下の式によって記述している。

$$A_k = \frac{2}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{B_{k-2m-1}}{2m+1} \quad (5.1.a)$$

$$B_k = -\frac{2}{\pi} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{A_{k-2m-1}}{2m+1} \quad (5.1.b)$$

ここに $A_k = F_k \cos \phi_k$, $B_k = -F_k \sin \phi_k$, F_k は k 次のフーリエ振幅, ϕ_k は k 次の位相角。

著者は式 (5.1) を基に, Fig.5.2 や Fig.5.4 に見られる関係, すなわちフーリエ振幅が大きな周波数では位相差分の値が確定的になり, フーリエ振幅が小さい周波数では位相差分の値の変動が大きくなるという関係について以下のような説明を与える。

まず前提として, 地震動は本当に因果関数と見なしてよいか, についてだが時刻歴の末尾に N 個の 0 を付加すれば (例えば 32768 個のデータからなる波形なら 32768 個の 0 を末尾に付加する) 波形は因果関数と見なせるし⁷⁾, 記録の後半部分の振幅が十分に 0 に近い場合でも地震動波形は因果関数と見なすことが出来る。

今, 実数 $A_k (k = 1, 2, \dots, 11)$ を因果関数をフーリエ変換して得られる実部とし, 式 (5.1) を用いて虚部 $B_k (k = 1, 2, \dots, 11)$, さらに位相角 $\phi_k = \arctan (-B_k/A_k)$ とフーリエ振幅 $F_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}$ の大きさを推定する. まず A_1, A_2, \dots, A_5 と A_7, A_8, \dots, A_{11} を絶対値が小さい実数, A_6 のみを他と比べて絶対値がかなり大きな正の実数とする. 式 (5.1) に従って B_4 から B_8 を表現すると以下のようなになる.

$$B_4 = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{A_1}{3} + \frac{A_3}{1} + \frac{A_5}{-1} + \frac{A_7}{-3} + \frac{A_9}{-5} + \frac{A_{11}}{-7} \right)$$

$$B_5 = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{A_2}{3} + \frac{A_4}{1} + \frac{A_6}{-1} + \frac{A_8}{-3} + \frac{A_{10}}{-5} \right)$$

$$B_6 = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{A_1}{5} + \frac{A_3}{3} + \frac{A_5}{1} + \frac{A_7}{-1} + \frac{A_9}{-3} + \frac{A_{11}}{-5} \right)$$

$$B_7 = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{A_2}{5} + \frac{A_4}{3} + \frac{A_6}{1} + \frac{A_8}{-1} + \frac{A_{10}}{-3} \right)$$

$$B_8 = -\frac{2}{\pi} \left(\frac{A_1}{7} + \frac{A_3}{5} + \frac{A_5}{3} + \frac{A_7}{1} + \frac{A_9}{-1} + \frac{A_{11}}{-3} \right)$$

上の式から $A_4 \sim A_8$ と $B_4 \sim B_8$ の符号を+, -, ? (未知) で, 絶対値を大, 小のいずれかで表すと次のようになる.

$$A_4 : ?, \text{小} \quad B_4 : ?, \text{小}$$

$$A_5 : ?, \text{小} \quad B_5 : +, \text{大}$$

$$A_6 : +, \text{大} \quad B_6 : ?, \text{小}$$

$$A_7 : ?, \text{小} \quad B_7 : -, \text{大}$$

$$A_8 : ?, \text{小} \quad B_8 : ?, \text{小}$$

以上から, フーリエ振幅の大小関係は $F_6 > F_5, F_7 \gg F_4, F_8$ となろう. それではこの例では位相角はどうなるだろうか. Fig.5.5 に, 横軸を $(-B/A)$ とし縦軸を位相角 $\phi = \arctan (-B/A)$ とした時のプロットを示す. Fig.5.5 から明らかなように実部 A の符号に応じて位相角 ϕ の値は異なる. また A の符号に依らず, $\left| \frac{-B}{A} \right|$ が大きい限りなく 0 に近い時に ϕ の値は確定的になる.

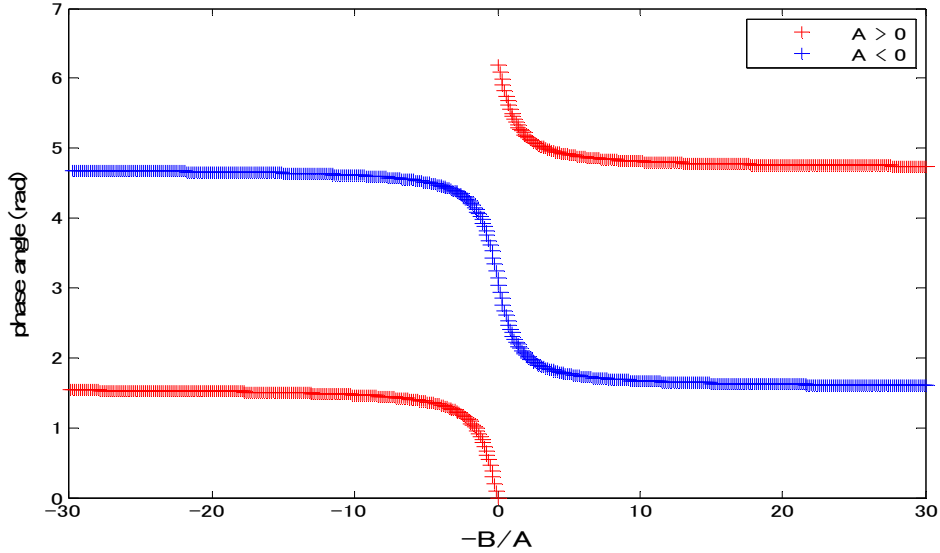


Fig.5.5: relation of $-B/A$ and phase angle

先の例に戻ると, A_6 は絶対値が大きな正の実数だから, $(-B_6/A_6)$ は絶対値が小さな数と考えられる. 然らば Fig.5.5 から, $\phi_6 \approx 0$ (or 6.28) rad としてよい. また A_5 と A_7 を共に正とすれば $(-B_5/A_5)$ は絶対値が大きな負, $(-B_7/A_7)$ は絶対値が大きな正の数と推定でき, Fig.5.5 から $\phi_5 \approx 1.5$ rad, $\phi_7 \approx 4.8$ rad となる. よって位相差分 $\Delta\phi_5 = \phi_6 - \phi_5 \approx -1.5$ rad, $\Delta\phi_6 = \phi_7 - \phi_6 \approx 4.8$ rad と確定的な値が得られる. ちなみにこの $\Delta\phi_5 \approx -1.5$ rad, $\Delta\phi_6 \approx 4.8$ rad の二つの値は A_5 と A_7 の符号を変えても得られる. 一方で ϕ_4 と ϕ_8 については $(-B_4/A_4)$ と $(-B_8/A_8)$ の絶対値の大きさや符号が確定していないのでどのような値にもなりうる. よって

$$\begin{aligned} \phi_4(\text{不確定}) - \phi_3(\text{不確定}) &= \Delta\phi_3(\text{かなり不確定}), \quad \phi_5(\text{確定的}) - \phi_4(\text{不確定}) = \\ \Delta\phi_4(\text{不確定}), \quad \phi_8(\text{不確定}) - \phi_7(\text{確定的}) &= \Delta\phi_7(\text{不確定}), \quad \phi_9(\text{不確定}) - \phi_8(\text{不確定}) = \\ \Delta\phi_8(\text{かなり不確定}) \end{aligned}$$

となる. (あるばらつきを持った二つの集合の和は, さらに大きなばらつきを持つ. 例えば Ang and Tang (1975)⁸⁾ など)

よってこの例では, フーリエ振幅が大きい F_6 の場合, 位相差分 $\Delta\phi_5$ と $\Delta\phi_6$ は値が確定し, フーリエ振幅が小さくなるほど, 対応する位相差分の値は不確定さを増すことが示せた. (この結論は A_6 の符号を変えても成り立つ)

それでは実部・虚部ともに絶対値が大きい場合にはどのようなになるか. それを考察するため, 次のような例を考える. A_5 と A_6 を同程度に絶対値の大きい正の数として, その他の A_1, A_2, \dots, A_4 と A_7, A_8, \dots, A_{11} を符号は未知だが絶対値の小さな数と仮定する. 最初の例と同様に実部 A と虚部 B の符号や大小関係を示すと次のようになる.

$$\begin{array}{ll} A_3 : ?, \text{小} & B_4 : ?, \text{小} \\ A_4 : ?, \text{小} & B_4 : +, \text{大} \\ A_5 : +, \text{大} & B_5 : +, \text{大} \\ A_6 : +, \text{大} & B_6 : -, \text{大} \\ A_7 : ?, \text{小} & B_7 : -, \text{大} \\ A_8 : ?, \text{小} & B_8 : ?, \text{小} \end{array}$$

Fig.5.5 から A_4 と A_7 の符号に依らず, $\phi_4 \approx 1.5 \text{ rad}$, $\phi_7 \approx 4.8 \text{ rad}$ と推定できる. また A_5 と A_6 を同程度に絶対値の大きい数と仮定したので, $\phi_5 \approx 0.5 \text{ rad}$, $\phi_6 \approx 5.7 \text{ rad}$ と概ね決まってくる. 一方, ϕ_3 と ϕ_8 の値は不確定であり, Fig.5.5 によれば 0 から 2π までのどの値とも考えうる. よってこの例でも, フーリエ振幅が大きい F_5 と F_6 の場合, 位相差分 $\Delta\phi_4$ (およそ -1.0 rad) $\cdot \Delta\phi_5$ (およそ -1.28 rad) $\cdot \Delta\phi_6$ (およそ -0.9 rad) の値は確定的で, フーリエ振幅が小さくなるほど対応する位相差分の値は不確定さを増す. (この結論は A_5 や A_6 の符号を変えても成り立つ.)

以上のシンプルな二つの例では実部と虚部のどちらかあるいは, どちらも大きいとフーリエ振幅は大きくなる. そして片方が大きい時には位相角の値が確定的になるし, 両方が大きい時でも $(-B/A)$ の絶対値は不定でも符号は分かる. Fig.5.5 を見ると $(-B/A)$ の符号が分かれば, 位相角として考えうる範囲は狭まる. 結果としてフーリエ振幅が大きい周波数では小さい周波数より位相差分の値が確定しやすいと考えられる. なお上の二例では A_5 や A_6 が非常に大きい, と仮定したがどれくらい大きいかによっても位相差分の値は変わってくる.

ここまで考察した時点で次の二点について議論したい.

- Fig.5.2.i の位相差分とフーリエ振幅の関係を見ると, Fig.5.2.a のほど明瞭には傾向が見えない
- 実務で扱うなめらかで周波数領域での変動が少ないフーリエ振幅に, 実際の地震動から得た位相差分は (因果性やヒルベルト変換の関係を満たすという文脈上で) 適用できるか

まず a) について. Fig.5.1.i の波形を見ると記録の後半部分の振動が大きく, 因果性を満足していないと考えられる. そこで Fig.5.6 のように記録のちょうど半分の時点から振幅を 0 とおいて, 因果関数としてみる.

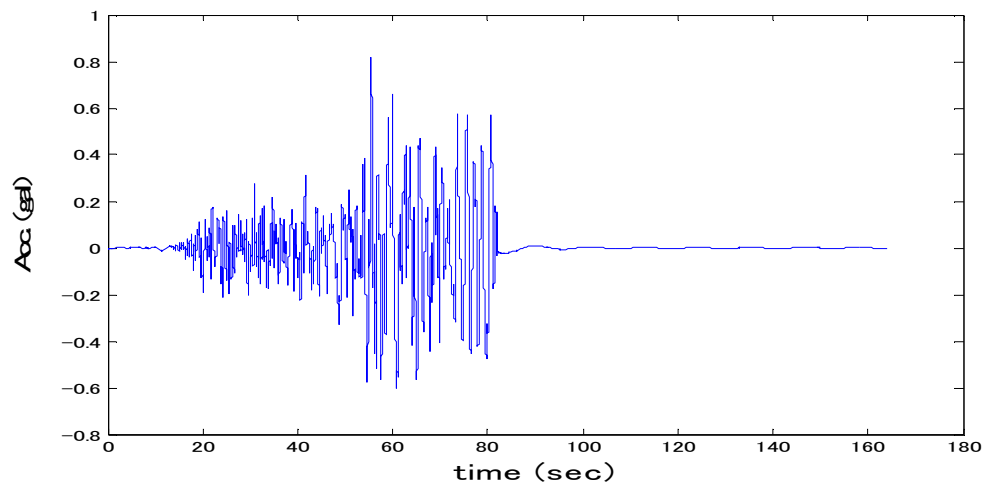


Fig.5.6: ground motion example in Fig.5.1.i without zero amplitude after 81.92 s

そして Fig.5.6 の波形において位相差分とフーリエ振幅の関係を見ると Fig.5.7 のようになる. Fig.5.7 を見ると, Fig.5.2.a に見られるような傾向が明瞭に見える. このことから, いかなる記録波形でも後続に 0 を加えて因果関数とすれば Fig.5.6 のような位相差分とフーリエ振幅の関係が得られると推察される.

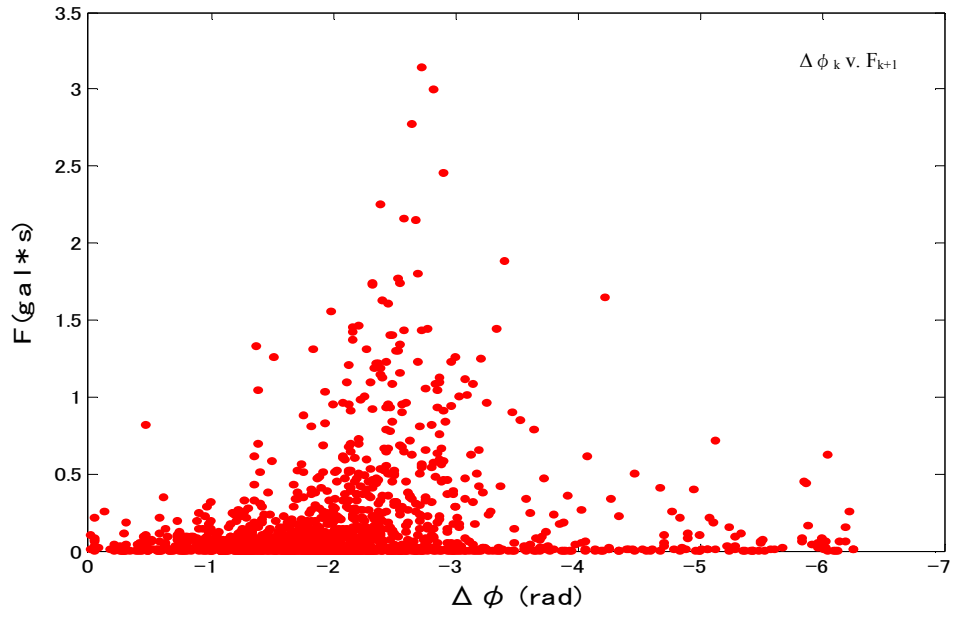
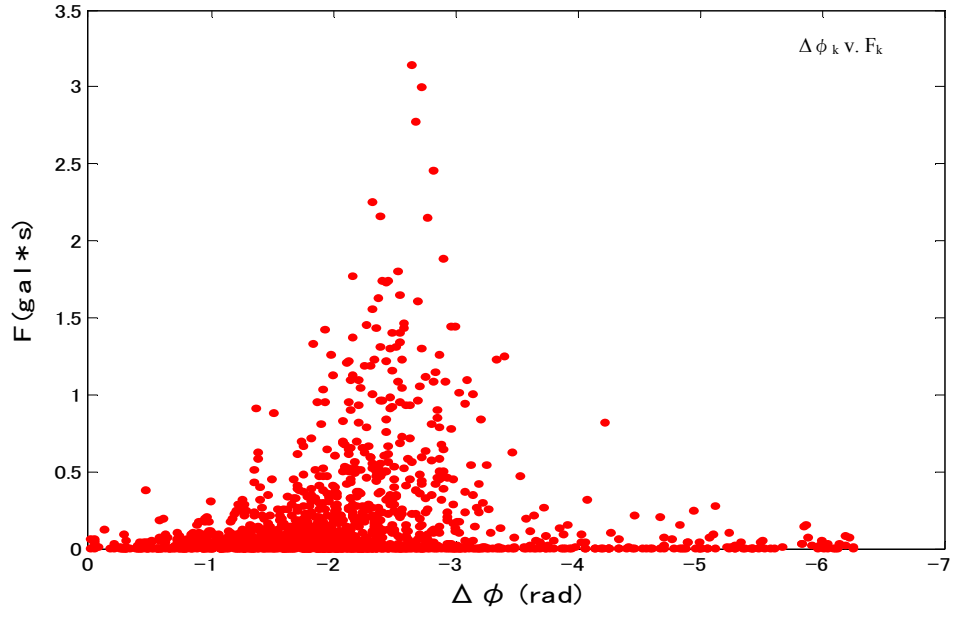


Fig.5.7: relation between phase difference and Fourier amplitude for ground motion case in Fig.5.6

それでは b) の実務で扱う なめらかなフーリエ振幅に実際の地震動の位相差分は適用できるか、について考察する. 著者は次のようなアルゴリズムを考案した. 初期のなめらかな形状のフーリエ振幅を F_k (添え字 k は興味のある周波数帯域に対応する番号としてよい. 検討しない帯域の振幅成分は 0 とおいて無視する) とすると

1. 考慮する周波数帯域において, 位相差分 $\Delta\phi_k$ を定義する. 検討しない周波数帯域では位相差分 $\Delta\phi$ はランダムとしてよい. そこから位相角 ϕ を算出する
2. 全周波数領域で $A = F * \cos(\phi)$ と $B = F * \sin(\phi)$ を算出する.
3. B^* を A をヒルベルト変換して求める (もし既に F と $\Delta\phi$ が完全にヒルベルト変換の関係で説明できるのであれば, この時点で $B = B^*$ である. 実際はそうならないであろう. B と B^* の相関性を見るため, 検討する帯域において相関係数を算出しておく. また B と B^* の散布図を目視する)
4. A と B^* から, 更新されたフーリエ振幅 F_{new} を定める.
5. 検討する帯域内での F と F_{new} のエネルギー比 $R = \frac{\sum_k F_k^2}{\sum_k F_{new,k}^2}$ を求める
6. $F_{new}^* = F_{new} * \sqrt{R}$ によって, エネルギーレベルが保たれた F_{new}^* を定義する
7. F_{new}^* を F と置換し, 手順 2 に戻る

以上のアルゴリズムを B と B^* の相関が十分に高いと判断出来るまで続ける. もし B と B^* が完全相関ならば F と ϕ をフーリエ変換して合成される波形は完全な因果性を満足する. このアルゴリズムを基に記述した Matlab プログラムを Appendix.A に示す.

著者は上のアルゴリズムを踏まえて次のような検討を行った. まず検討する帯域を 0.1–10.0 Hz として, Boore (1983) の加速度震源スペクトルを定義した. パラメータは応力降下量を仮定せず直接 $\omega_c = 0.1 * 2\pi$ (rad/sec) とし, その他に関しては $R_{\theta\phi} = 0.63$, $Fs = 2$, $P_{RTMIN} = 1$, $s = 4$, $\omega_m = 6.0 * 2\pi$ rad/sec, M_0 は $M_w = 7.0$ において式 (4.3) を基に推定した. なお 0.1 Hz 以下および 10.0 Hz 以上の成分はカットした. スペクトルの概形を Fig.5.8 に示す. またこの例ではサンプリング周波数を 200 Hz, データ数 N を 32768 としている.

次に 2001 年芸予地震の KiK-net 西条サイト (地中 NS 成分) の 0.1–10.0 Hz における位相差分をこのケーススタディのために用いることとした. なお KiK-net 西条サイトの観測波形は後続部の振幅がどの周波数成分波を見ても小さく, 因果性を概ね満たしている.

そして Appendix.A, A.7 のプログラムで 10 回繰り返し計算を行い, B と B^* の相関係数と散布図を見た. 計算回数が 1, 2, 3, 4, 5, 10 回目の時の B と B^* の散布図を, その右下に相関係数を記して Fig.5.9 に示す.

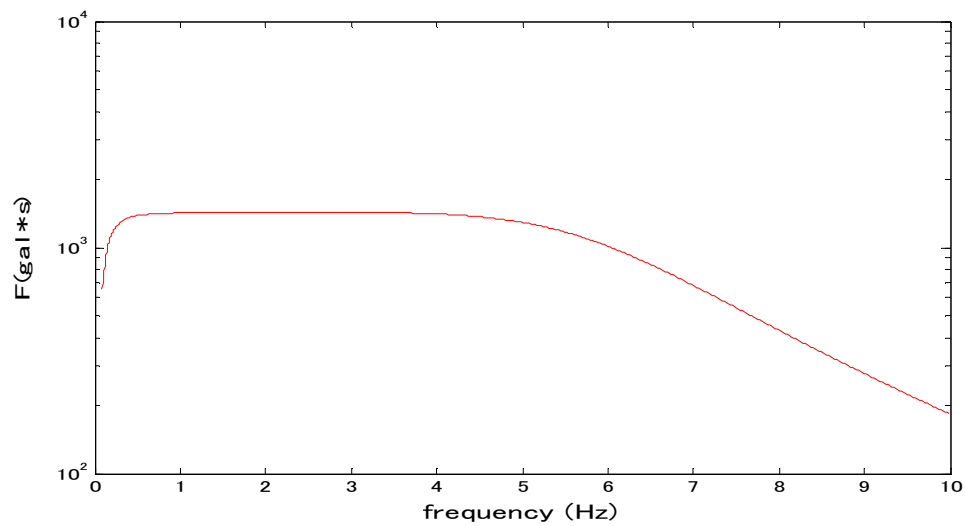


Fig.5.8: example of Boore (1983)'s source acceleration Fourier spectrum

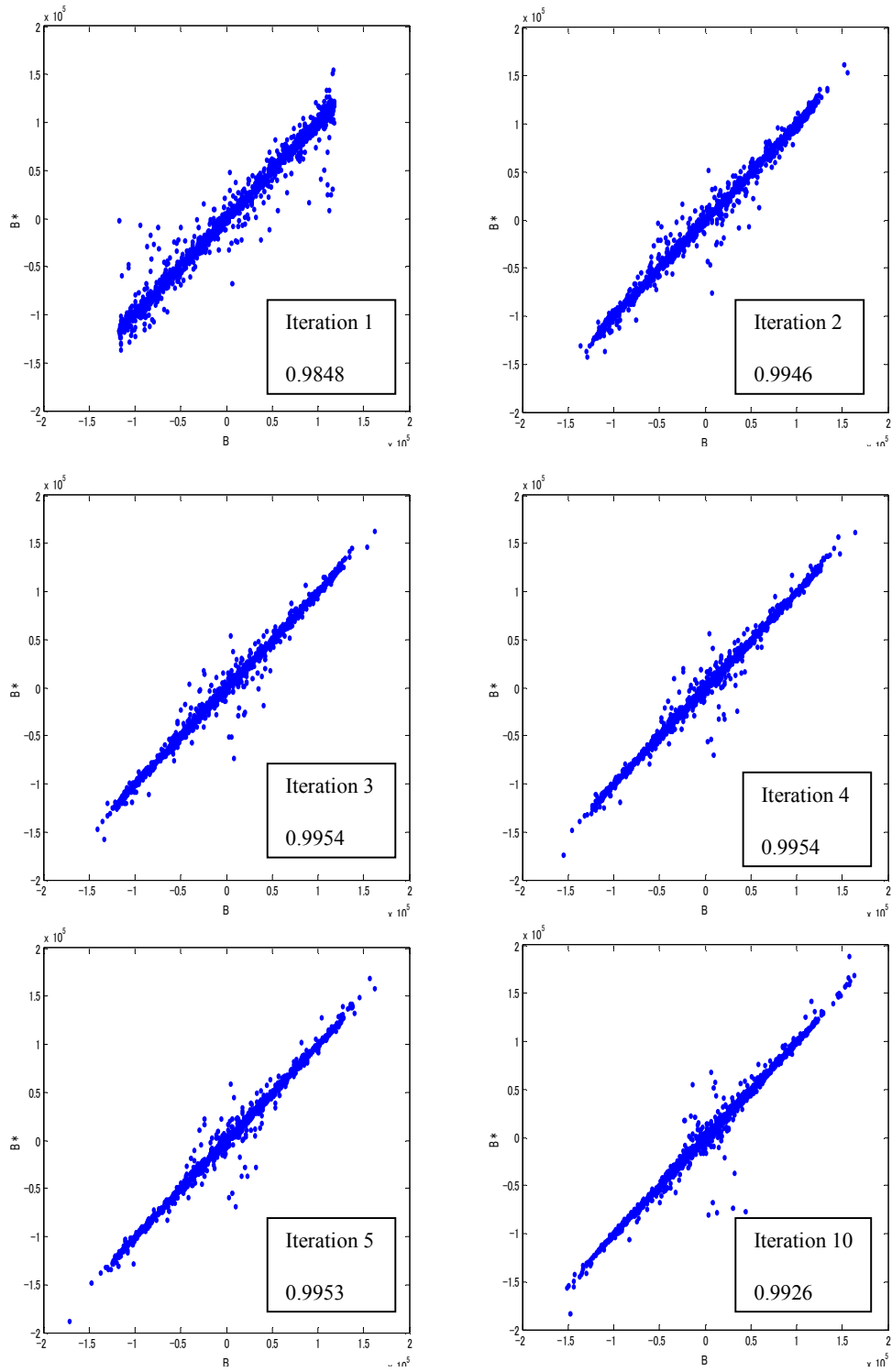


Fig.5.9: correlation of B and B^* for different numbers of iterations

Fig.5.9 では繰り返し回数が 3 回目以降になると散布図はほとんど変化しない. 他の波形の位相差分を用いても同様の結果を得た. よって著者は繰り返し回数は 3 回程度で良いと判断した.

繰り返し回数を 3 とし F を求めた. 得られたフーリエ振幅と元のフーリエ振幅を Fig.5.10 に示す. 推定されたフーリエ振幅はなめらかなスペクトルと同等のエネルギーを持っているが, ぎざぎざしている. また合成された加速度波形を Fig.5.11 に示す. 記録時間の半分である 81.92 秒以下の振幅が小さいことが見て取れる.

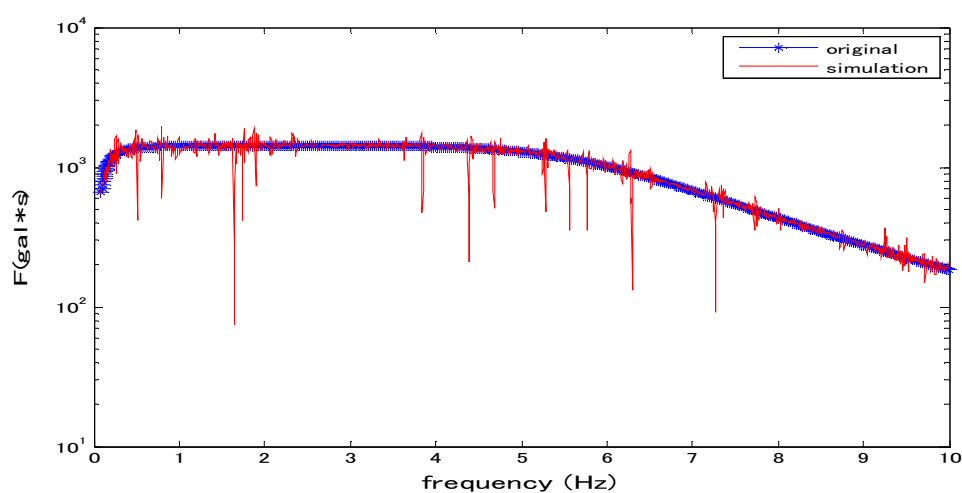


Fig.5.10: simulated Fourier spectrum

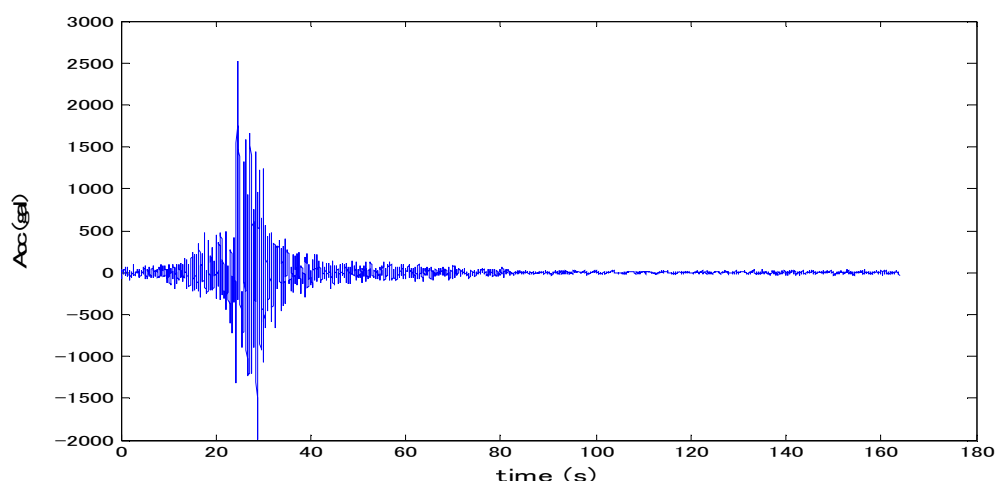


Fig.5.11: simulated ground motion

5.3 因果性を満たす地震動とそうでない地震動の比較

本節では因果性を満たす地震動とそうでない地震動の特性を比較する。

因果性を満たす地震動を作成する。まず実際に観測された地震動の中から、2.2 節で議論した 5 つの周波数帯域全てにおいて因果性を満たしているものを選ぶ。そして選ばれた地震動の位相差分と 5.2 節で議論したアルゴリズムによって、Fig.5.8 のなめらかなフーリエ振幅をぎざぎざさせる。繰り返し計算回数は 3 回とした。そして元の位相差分とぎざぎざさせたフーリエ振幅から波形を合成する。この波形を A1 と呼ぶことにする。

それに対して、因果性を満たしていない波形は二種類定義した。まず一種類目だが A1 の波形について、2.2 節で議論した 5 つの帯域内それぞれにおいて位相差分をランダムに並べ替える。そして、上で推定したぎざぎざしたフーリエ振幅と並び変えた位相差分から波形を合成する。この操作を 10 回行った。この手法による波形を B1 と呼ぶ。B1 の波形は元の位相差分と同一の統計量を持ちながら、因果性は満足していない。

二種類目は次のように作成した。A1 の波形について、2.2 節で議論した 5 つの帯域毎に位相差分の μ , σ を算出する。そしてそれらを基に正規乱数を発生させ各帯域の位相差分とし、先のぎざぎざしたフーリエ振幅と組み合わせて波形を合成する。この操作を 10 回行った。この方法による波形を C1 と呼ぶ。C1 の波形の位相差分は元の波形の位相差分の μ と σ のみ有し、因果性は満足していない。

それぞれの手法で作成された波形の例を Fig.5.12 に示す。

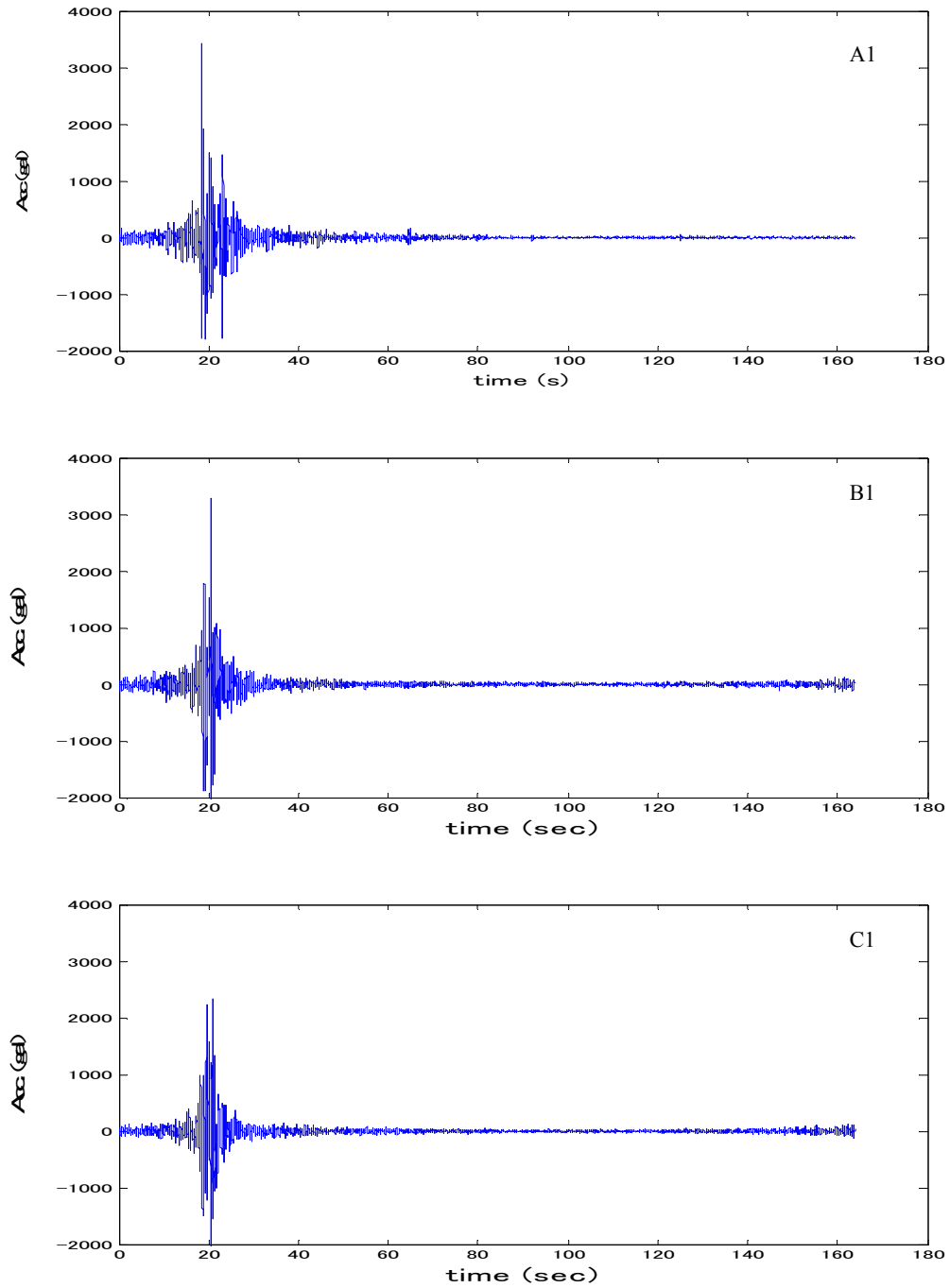


Fig.5.12: ground motion A1 and examples of ground motions B1 and C1

5.3.1 応答スペクトルによる比較

作成された波形の 5%減衰応答スペクトルを比較する. まず波形 A1 の応答スペクトルを算出し, PGA と 2.2 節で扱った 5 つの帯域それぞれにおけるスペクトル応答の平均値を求める. 同じ計算を 10 波の B1 の波形個々について行う. そして各帯域における B1 の個々の波形のスペクトル応答値 (PGA 含む) を A1 の波形のスペクトル応答値で除す. この値を R_{SR} と呼ぶ. 最後に 10 個ある R_{SR} の平均と標準偏差を取り, それぞれ μ_{RSR} と σ_{RSR} とする. C1 の波形についても全く同様に μ_{RSR} と σ_{RSR} を算出する. Table.5.2 にそれぞれの種類の波形群における μ_{RSR} と σ_{RSR} の値を示す.

Table.5.2: values of μ_{RSR} and σ_{RSR} in each frequency band for B1 and C1

a) ground motion B1s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	1.087	1.083	1.302	1.183	1.313	1.082
σ_{RSR}	0.049	0.109	0.061	0.089	0.121	0.080

b) ground motion C1s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	1.242	1.232	1.468	1.450	1.357	1.241
σ_{RSR}	0.053	0.075	0.095	0.075	0.138	0.181

Table.5.2 の μ_{RSR} を比較すると, 全体的に B1 の波形の方が C1 の波形よりスペクトル応答値は小さく, A1 の波形からの誤差が少ない. 著者は 5 つの周波数帯域全てにおいて因果性を満たしている波形をさらに三波選択し, 同じ検討をした. 位相差分の種類に応じて波形の名称を[A2, B2, C2], [A3, B3, C3], [A4, B4, C4] と表記する. 各々の結果を Table.5.3, Table.5.4, Table.5.5 にそれぞれ示す. それぞれの結果のうち μ_{RSR} に注目するとほとんどのケースにおいて B2, B3, B4 の波形の応答値の方が C2, C3, C4 の波形の応答値より小さい. 特に 3.0 – 5.0 Hz と 5.0 – 10.0 Hz における両者の差は大きい. 一方, σ_{RSR} には波形の種類による明確な傾向の差はない.

この検討の結果から推察するに β_3 と β_4 まで考慮して位相差分を定義し作成された波形は, μ と σ のみ定義して正規乱数と仮定された位相差分を持つ波形より, 特に高周波数帯域で小さい応答を示す可能性がある.

Table.5.3: values of μ_{RSR} and σ_{RSR} in each frequency band for A2, B2 and C2

a) ground motion B2s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	1.054	1.086	1.170	1.196	1.084	0.772
σ_{RSR}	0.043	0.050	0.070	0.049	0.138	0.103

b) ground motion C2s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	1.099	1.112	1.267	1.239	1.289	0.831
σ_{RSR}	0.036	0.047	0.060	0.055	0.127	0.118

Table.5.4: values of μ_{RSR} and σ_{RSR} in each frequency band for A3, B3 and C3

a) ground motion B3s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	1.137	1.197	1.207	1.225	1.289	1.188
σ_{RSR}	0.030	0.064	0.074	0.077	0.082	0.124

b) ground motion C3s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	1.240	1.194	1.190	1.309	1.405	1.255
σ_{RSR}	0.070	0.064	0.062	0.080	0.093	0.168

Table.5.5: values of μ_{RSR} and σ_{RSR} in each frequency band for A4, B4 and C4

a) ground motion B4s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	0.833	1.166	1.119	1.126	1.009	0.860
σ_{RSR}	0.049	0.058	0.058	0.080	0.089	0.107

b) ground motion C4s

	0.1-1.0Hz	1.0-2.0Hz	2.0-3.0Hz	3.0-5.0Hz	5.0-10.0Hz	PGA
μ_{RSR}	0.866	1.260	1.212	1.236	1.132	0.874
σ_{RSR}	0.037	0.060	0.117	0.092	0.138	0.100

5.3.2 地震動の包絡形による比較

最後に本節で作成された波形の包絡形を比較する. B1 の 10 波の包絡形を描き, その平均を取る. C1 の 10 波についても同様の処理をする. そして A1 の波形の包絡形と比べた. 結果を Fig.5.13 に示す. また [A2, B2, C2], [A3, B3, C3], [A4, B4, C4] についても全く同じ様に包絡形を比較した. 結果を Fig.5.14, Fig.5.15, Fig.5.16 にそれぞれ示す.

それぞれの図を見ると, 実際の位相差分をランダムに並べ替えた B1, B2, B3, B4 の四種類と正規乱数を位相差分とした C1, C2, C3, C4 の四種類はほぼ同形状の包絡形を有している.

以上のことから, 高次モーメントを含んだ統計量だけで位相差分を定義しても実際の波形の包絡線との差は依然大きいと言える.

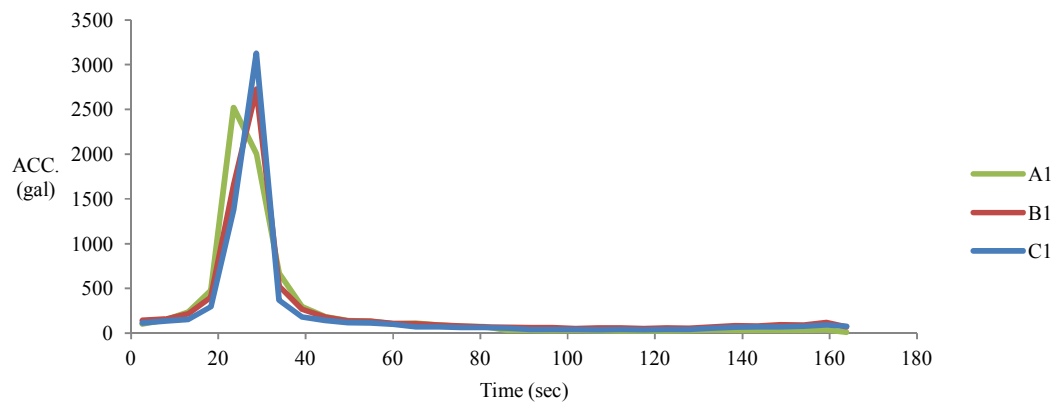


Fig.5.13: envelopes for A1, B1 and C1

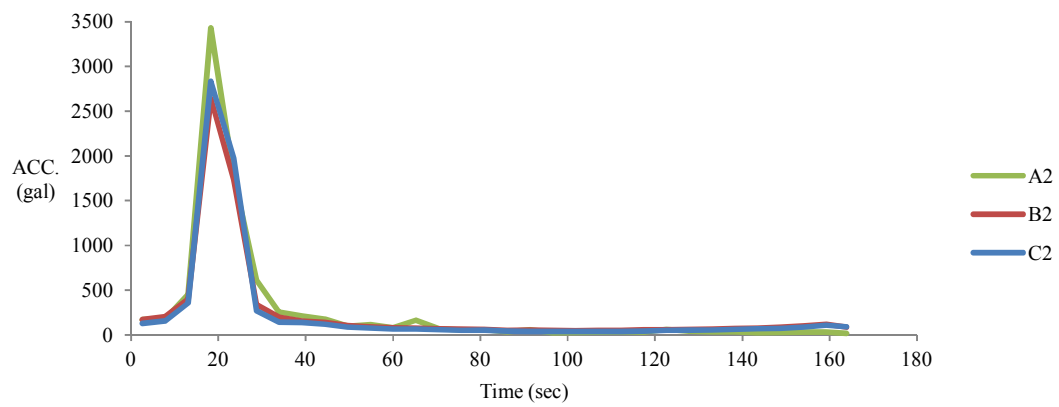


Fig.5.14: envelopes for A2, B2 and C2

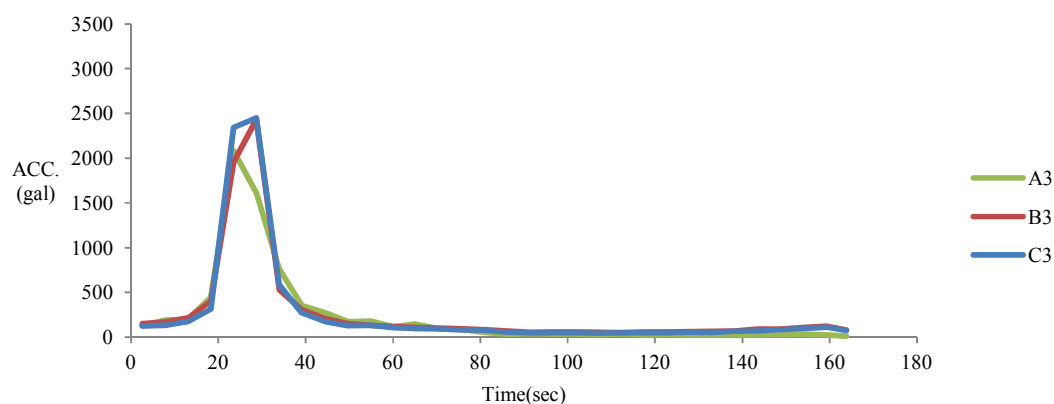


Fig.5.15: envelopes for A3, B3 and C3

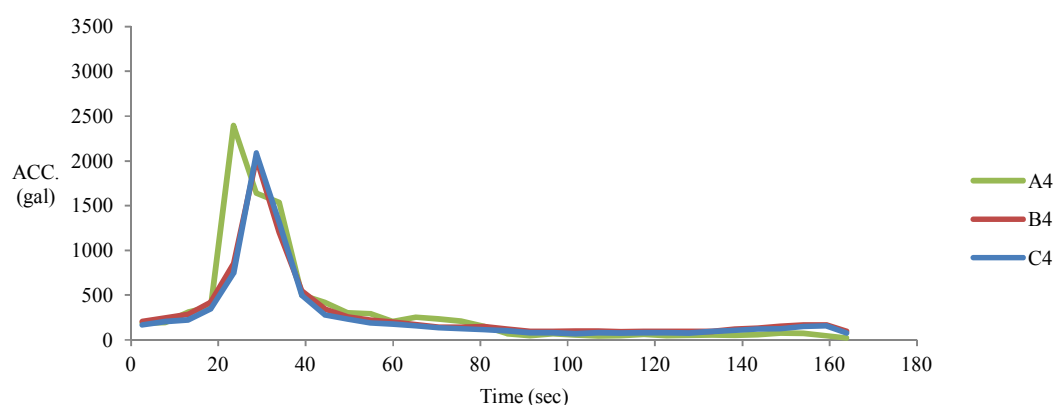


Fig.5.16: envelopes for A4, B4 and C4

5.4 まとめ

本章では位相差分とフーリエ振幅の関係について考察した. 5.1 節でいくつかの波形について位相差分とフーリエ振幅の関係を示し, 両者の間に関係性があると指摘した. 5.2 節では因果関数をフーリエ変換した時の実部と虚部のヒルベルト変換の関係性について触れ, 簡単な例を用いて位相差分とフーリエ振幅の関係を考察した. また実部と虚部のヒルベルト変換の関係性を満足するアルゴリズムを提案し, 実務で使用するなめらかなスペクトルを位相差分の値を基にして, エネルギーを損失することなしに意図的にぎざぎざさせることを試みた. 最後に 5.3 節で, 因果性を満たす地震動とそうでない地震動の特性を応答スペクトルと包絡形を基準に比較した. 応答特性については, 特に高周波数帯域で位相差分を高次モーメントまで考慮して定義した場

合は正規乱数を位相差分とするよりも応答レベルが低減することを指摘した。包絡形については実際に得られた位相差分を並べ替えて定義しても、正規乱数を位相差分としても作成される波形には違いが見られなかった。

第五章の参考文献

- 1) 壇一男, 渡辺孝英, 神田順 : Wiener - Lee 変換を用いて地震動波形の Fourier 振幅から時刻歴波形を再現する試み : その 1. 位相の推定の方法, 日本建築学会学術講演梗概集 B, 構造 I, pp. 377 - 378, 1986.
- 2) 渡辺孝英, 壇一男, 神田順 : Wiener - Lee 変換を用いて地震動波形の Fourier 振幅から時刻歴波形を再現する試み : その 1. 計算例, 日本建築学会学術講演梗概集 B, 構造 I, pp. 379 - 380, 1986.
- 3) 白井克弘, 大町達夫 : 地震動のフーリエ振幅と位相の関連性について, 土木学会地震工学論文集 28 No.7, pp. 1 - 6, 2005.
- 4) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦 : 震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集 No.612/I-46, pp. 201 - 213, 1999.
- 5) 和泉正哲, 栗田哲, 遠藤良幸, 飛田潤, 半沢徹也 : 表層地盤の地震波動伝播システムにおける伝達関数の因果性と因果伝播関数の構成要素に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 412 号, pp. 31 - 41, 1990.
- 6) Papoulis, A. (1977), "Signal Analysis", McGraw-Hill, Inc.
- 7) 佐藤忠信, 室野剛隆 : 位相情報を利用した非定常地震動のシミュレーション法, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp. 159 - 168, 2004.
- 8) Ang, A., H-S. and W.H. Tang (1975), "Probability Concepts in Engineering", JOHN WILEY & SONS, INC.

6. 模擬地震動作成手法の提案

本論文の第二・三章で位相差分の σ と高次モーメント $\beta_3 \cdot \beta_4$ の関係性を論じ、 σ が分かれば $\beta_3 \cdot \beta_4$ の値が推定可能であることを示した。第四章では深部地盤の不均質性の影響を含む *E.A.* という指標により、 σ を地震のタイプ・周波数帯域毎に推定する手法を示した。第五章では地震動を因果関数の一種と見なし得ることを前提に、因果性（フーリエ変換した時の実部と虚部のヒルベルト変換の関係）を満足させるようなアルゴリズムを提案した。本章ではこれらの結果を生かして模擬地震動を作成する方法を提案する。

6.1 模擬地震動作成手法

本節では設計用模擬地震動の作成手順を説明する。

1. まず設計地点においてどのような地震が想定されているかを決定する。これには1. 地震の種類（直下型・プレート境界・スラブ内のいずれか）、2. 地震のモーメントマグニチュード、3. 地震の深さ、4. 震源の場所、の四つの情報が必要である。第四章において地震のタイプによって σ と *E.A.* の勾配が異なることを示したし、プレート境界とスラブ内地震では特に低周波数帯域において、マグニチュードや深さによって σ が増減する可能性がある」と論じた
2. 次に周波数帯域毎に、仮定された震源から設計地点に至るまでの平均的な *Q* 値を求め、その *Q* 値の大きさによって設計地が Group 1 から Group 6 のどれに分類されるかを調べる。
3. 設計地点が属する Group での震源距離 *D* とエネルギー減衰 *E.A.* の関係から、設計地点における各周波数帯域のフーリエ振幅のレベルを決める
4. 全周波数帯域においてなめらかなフーリエ振幅（Boore の ω^2 スペクトルや大崎スペクトルなど、地震動らしいスペクトル形状をしているものを使う）を準備し、手順3で決められた各周波数帯域の *E.A.* の値を基に、細かい周波数帯域毎に振幅を変更する
5. 続いて σ と *E.A.* の関係から、各周波数帯域における σ を推定する
6. σ が決まったら、第三章の最後に挙げられた各地震の σ と β_3 および σ と β_4 の関係を基に位相差分の $\beta_3 \cdot \beta_4$ を推定する
7. 適切な位相差分の μ を設定し、帯域毎に統計量 $[\mu, \sigma, \beta_3, \beta_4]$ を満たす集合を定義する。これは多項式変換法¹²⁾を利用してよいし、類似した統計量を持つ実際の地震動の位相差分をそのまま用いてもよい

8. 手順4で決定したフーリエ振幅と手順7で定義した位相情報からフーリエ逆変換によって波形を作成する。 σ が十分小さく、因果性を満足すると想定される地震動を作成する場合は、第五章で提案したアルゴリズムを用いてフーリエ振幅をぎざぎざさせた後に、フーリエ逆変換して波形を作成する。

以上の手順によって設計地点で予測されるエネルギーレベルを満足し、高次モーメントまで考慮された位相差分を持ち、継続時間が短い場合には因果性まで満足した地震波形を作成できる。この波形はせん断波速度 2000 m/s 以上の基盤において観測され则认为られるものである。以上の手順を Fig.6.1 にフローチャートにして示す。

ただし実務においては、作成された模擬地震動の応答スペクトルが国土交通省の告示スペクトル³⁾と同等のレベルを持っている必要がある。そういった地震動を作成するためには第五章で提案したアルゴリズムを多少変更しなければならない。具体的には第五章のアルゴリズムを次のようにする：

初期のなめらかな形状のフーリエ振幅を F_k （添え字 k は興味のある周波数帯域に対応する番号としてよい。検討しない帯域の振幅成分は 0 として無視する）とすると

1. 考慮する周波数帯域において、位相差分 $\Delta\phi_k$ を定義する。検討しない周波数帯域では位相差分 $\Delta\phi$ はランダムとしてよい。そこから位相角 ϕ を算出する
2. 全周波数領域で $A = F \cdot \cos(\phi)$ と $B = F \cdot \sin(\phi)$ を算出する。
3. B^* を A をヒルベルト変換して求める（もし既に F と $\Delta\phi$ が完全にヒルベルト変換の関係で説明できるのであれば、この時点で $B = B^*$ である。実際はそうならないであろう。 B と B^* の相関性を見るため、検討する帯域において相関係数を算出して置く。また B と B^* の散布図を目視する）
4. A と B^* から、更新されたフーリエ振幅 F_{new} を定める。
5. 更新されたフーリエ振幅 F_{new} と位相角 ϕ から波形を合成し、その波形の応答スペクトルを算出する
6. 検討する帯域において、手順5で作成された波形の応答スペクトルの平均エネルギーを同じ帯域での告示スペクトルの平均エネルギーで割り、 R とする
7. $F_{new}^* = F_{new} \cdot \sqrt{R}$ によって、告示スペクトルのエネルギーレベルを持つ F_{new}^* を定義する
8. F_{new}^* を F と置換し、手順2に戻る

このアルゴリズムを B と B^* の相関が十分に高いと考えられるまで続ける。

このようにして作成されたプログラムを Appendix.A の A.8 に掲載した。このプログラムを設計用模擬地震動作成手法の手順 8 で使用すれば、告示スペクトルと同等のレベルの応答スペクトルを持った波形を作成できる。ここで作成される波形は工学的基盤で観測されと考えられる波形である。6.2 節で実際に波形を作成し、ここで提案した手法の検証をする。

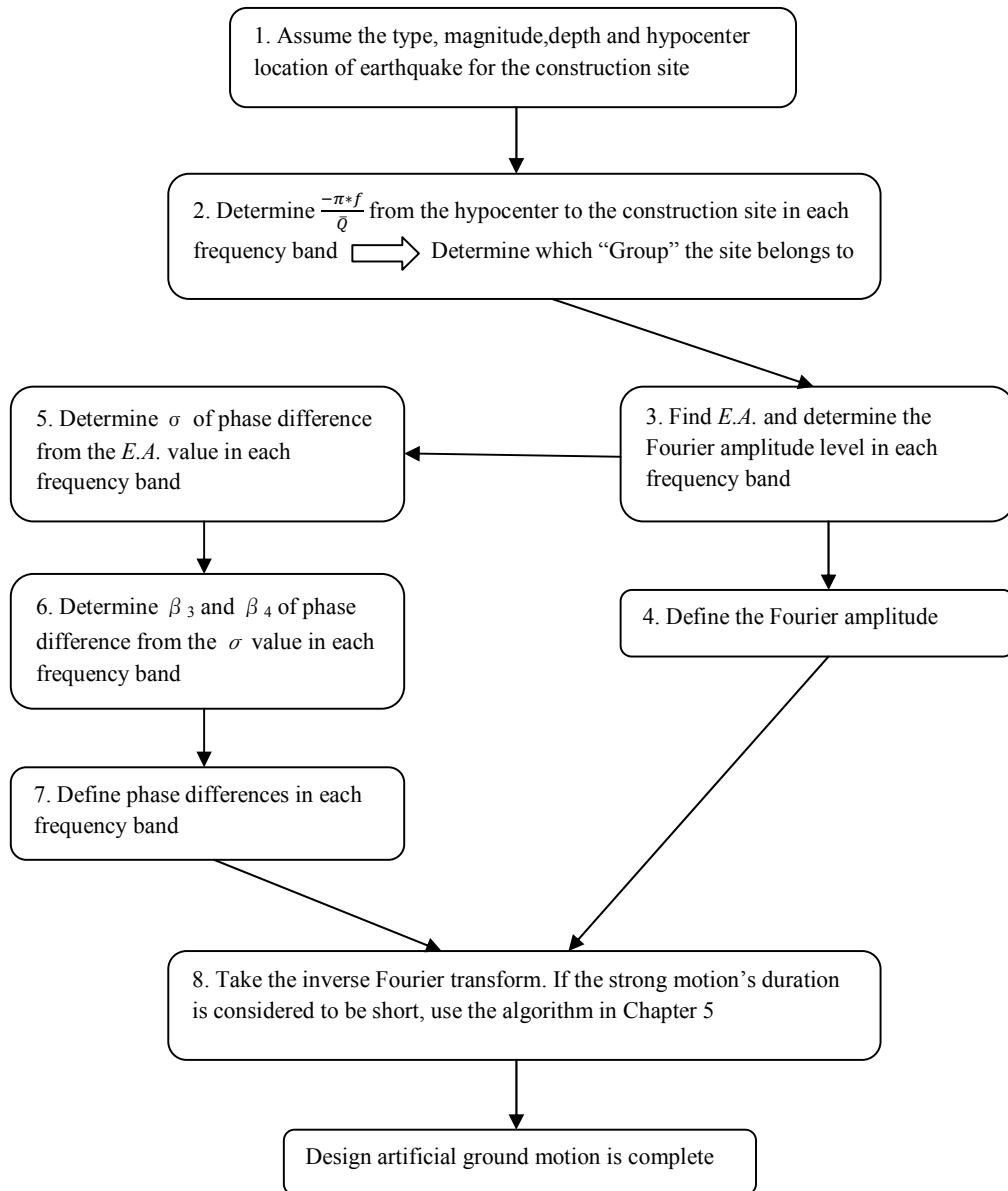


Fig.6.1: flowchart to generate the design ground motion based on this research

6.2 模擬地震動作成例

本節では 6.1 節で提案された模擬地震動作成手法を実際に適用し、波形を作成する。

まず最初の例として前節の手順 1 において、次のような地震を考える。

直下型の $M_w = 6.6$ 、震源深さは 10 km 程度、震源地は 2004 年新潟県中越地震と同じ

上の地震に対して硬質な基盤が地表から浅い、新潟県内にある震源距離 100 km の場所に構造物を設計すると仮定する。手順 2 として、震源から設計地点までの各周波数帯域における $\frac{-\pi * f}{Q}$ を計算したところ、設計地点は全ての帯域で Group 4 に属することが分かったとする。4.3.2 節の Fig.4.5 を参照すると各周波数帯域におけるエネルギー減衰 $E.A.$ が次の値になる（手順 3）。

$$0.1 - 1.0 \text{ Hz: } 10^{-5.16}$$

$$1.0 - 2.0 \text{ Hz: } 10^{-4.85}$$

$$2.0 - 3.0 \text{ Hz: } 10^{-5.21}$$

$$3.0 - 5.0 \text{ Hz: } 10^{-4.93}$$

$$5.0 - 10.0 \text{ Hz: } 10^{-4.94}$$

上の各帯域における $E.A.$ の値からこの設計地点におけるフーリエ振幅のレベルを決めることが出来る。4.3 節で著者が用いた 2004 年新潟県中越地震の加速度震源スペクトルモデルにおいて、各帯域で推定された $E.A.$ の平方根を掛け合わせることによって以下のようなスペクトルを得る（Fig.6.2）。

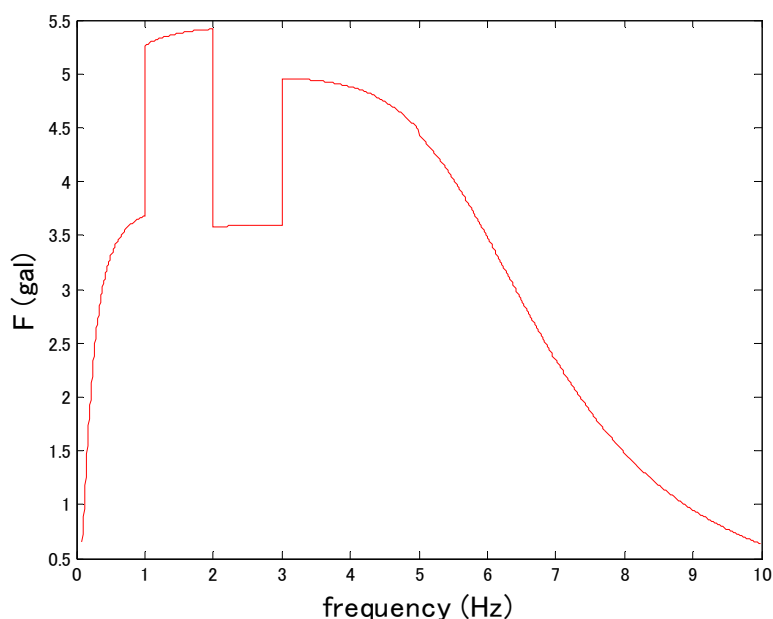


Fig.6.2: Fourier spectrum estimated from the value of E.A. in each frequency band

手順 5 に移る. 4.5.1 節では震源深さが 15 km 以内で M_w が 6.6~6.9 の直下型地震の結果は 2008 年岩手・宮城内陸地震を除いて σ と E.A. の関係が類似していることを示した. そこでまず Fig.4.53 中の 2008 年岩手・宮城内陸地震の結果を除いた σ と E.A. の関係と $E.A. = 10^{-5.16}$ から 0.1 – 1.0 Hz における位相差分の σ を推定すると $\sigma = 0.743$ rad を得る. 同様に Fig.4.55 から Fig.4.58 を用いて各周波数帯域の E.A. の値を基に σ を推定すると次のようになる.

1.0 – 2.0 Hz: 0.365 rad

2.0 – 3.0 Hz: 0.315 rad

3.0 – 5.0 Hz: 0.278 rad

5.0 – 10.0 Hz: 0.307 rad

続いて手順 6 として新潟県中越地震の σ と β_3 および σ と β_4 の関係を基に β_3 と β_4 の値を決める. 3.5 節の Table.3.3 の回帰係数からこれらの値を推定すると,

0.1 – 1.0 Hz: $\beta_3 = -0.714$, $\beta_4 = 5.23$

1.0 – 2.0 Hz: $\beta_3 = -0.463$, $\beta_4 = 6.34$

2.0 – 3.0 Hz: $\beta_3 = -0.290$, $\beta_4 = 6.57$

$$3.0 - 5.0 \text{ Hz: } \beta_3 = -0.298, \beta_4 = 6.99$$

$$5.0 - 10.0 \text{ Hz: } \beta_3 = -0.376, \beta_4 = 7.03$$

ここで位相差分の μ を決めなければならない. 帯域毎の σ を見ると, $0.1 - 1.0 \text{ Hz}$ における σ はそれ以外の帯域の σ に比べてかなり大きい. よって全帯域で同じ μ の値を与えるのは不適切である. それでは地震波形において隣り合う周波数帯域間で σ が異なる場合, μ の値はどの程度違っているのだろうか? これを評価するため, 著者はまず次のような指標を定義した.

$$\Delta \mu_1 = \mu_{1.0-2.0 \text{ Hz}} - \mu_{0.1-1.0 \text{ Hz}}$$

$$\Delta \sigma_1 = \sigma_{1.0-2.0 \text{ Hz}} - \sigma_{0.1-1.0 \text{ Hz}}$$

$$\Delta \mu_2 = \mu_{2.0-3.0 \text{ Hz}} - \mu_{1.0-2.0 \text{ Hz}}$$

$$\Delta \sigma_2 = \sigma_{2.0-3.0 \text{ Hz}} - \sigma_{1.0-2.0 \text{ Hz}}$$

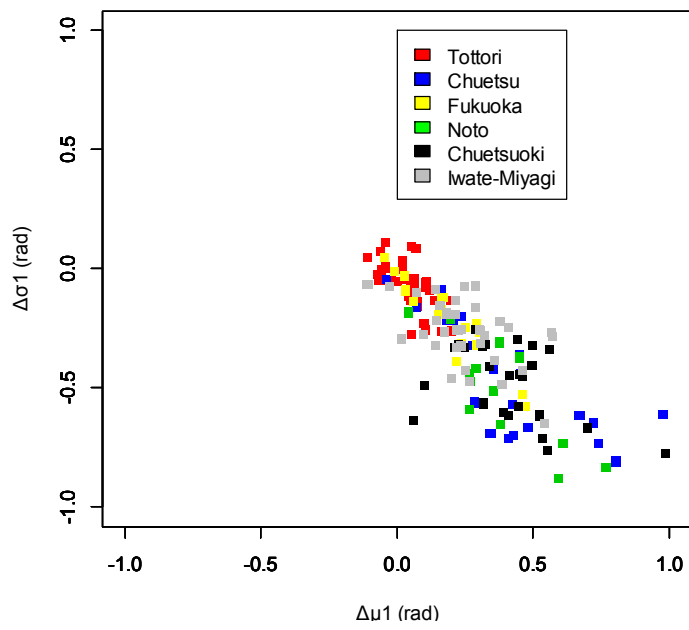
$$\Delta \mu_3 = \mu_{3.0-5.0 \text{ Hz}} - \mu_{2.0-3.0 \text{ Hz}}$$

$$\Delta \sigma_3 = \sigma_{3.0-5.0 \text{ Hz}} - \sigma_{2.0-3.0 \text{ Hz}}$$

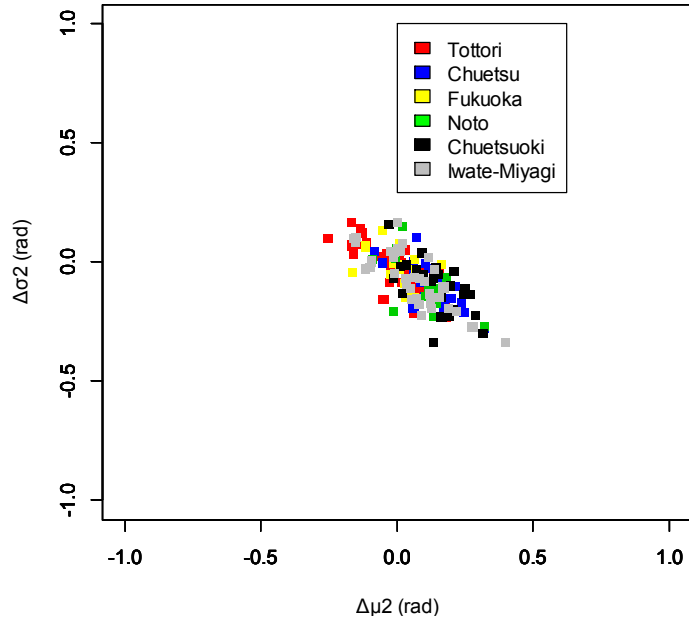
$$\Delta \mu_4 = \mu_{5.0-10.0 \text{ Hz}} - \mu_{3.0-5.0 \text{ Hz}}$$

$$\Delta \sigma_4 = \sigma_{5.0-10.0 \text{ Hz}} - \sigma_{3.0-5.0 \text{ Hz}}$$

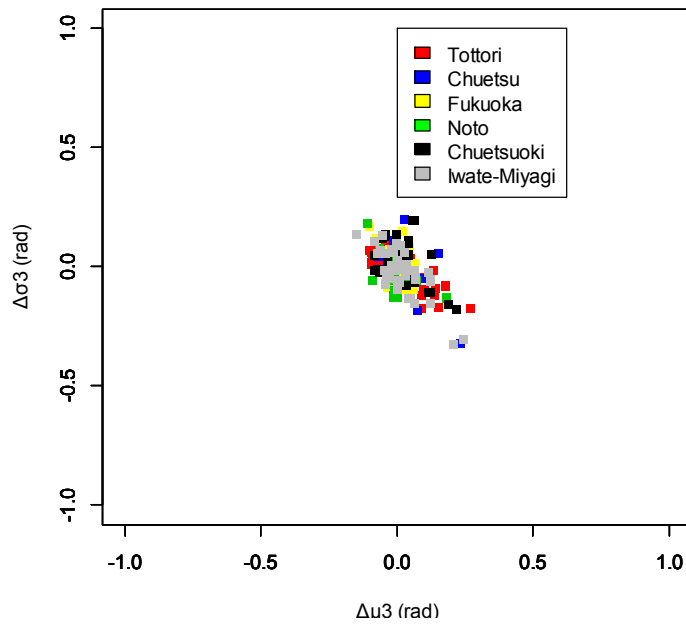
ここに μ 帯域, σ 帯域はそれぞれ, その帯域内の位相差分の μ と σ である. 著者は地震のメカニズム毎に “ $\Delta \mu_1$ と $\Delta \sigma_1$ ”, “ $\Delta \mu_2$ と $\Delta \sigma_2$ ”, “ $\Delta \mu_3$ と $\Delta \sigma_3$ ” および “ $\Delta \mu_4$ と $\Delta \sigma_4$ ” の散布図を作成した. 直下型地震の結果を Fig.6.3, プレート境界地震の結果を Fig.6.4, そしてスラブ内地震の結果を Fig.6.5 にそれぞれ示す. 各々の図を見ると地震間の結果の差はあまりない. また周波数帯域間の μ の差と σ の差には強い負の相関があることを見て取れる. この例において $\Delta \sigma_1 = \sigma_{1.0-2.0 \text{ Hz}} - \sigma_{0.1-1.0 \text{ Hz}}$ は -0.378 rad である. よって著者は $\Delta \mu_1$ を 0.38 rad とすることにした.



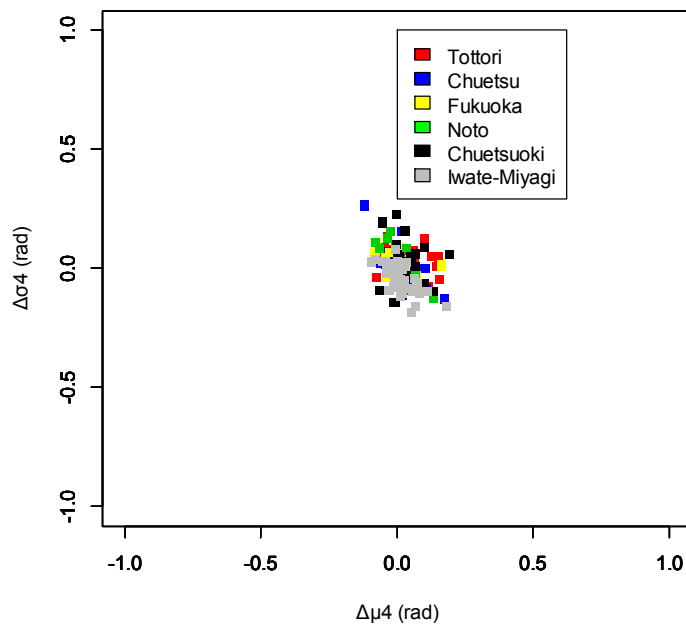
a) $\Delta\mu_1$ - $\Delta\sigma_1$ relation



b) $\Delta\mu_2$ - $\Delta\sigma_2$ relation

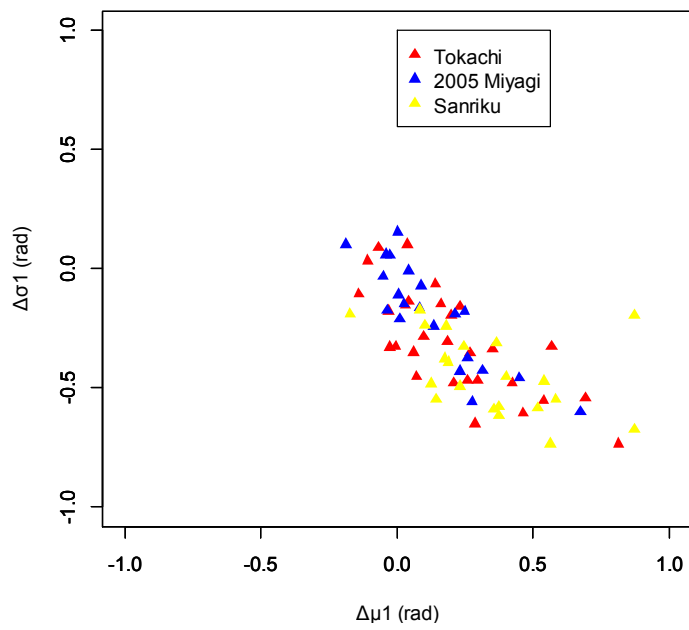


c) $\Delta\mu_3$ - $\Delta\sigma_3$ relation

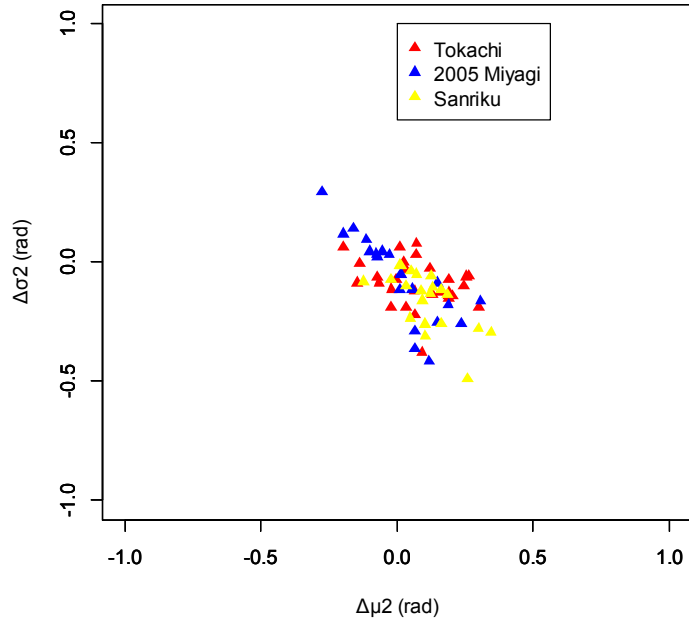


d) $\Delta\mu_4$ - $\Delta\sigma_4$ relation

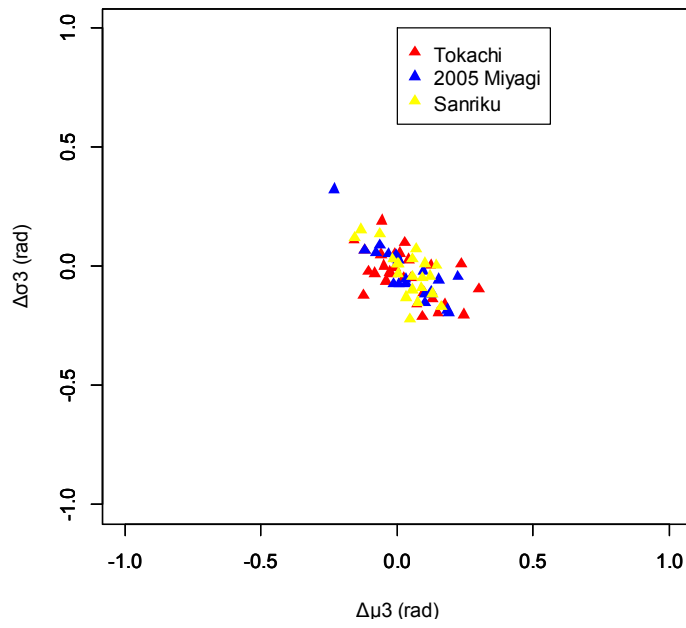
Fig.6.3: relation of $\Delta\mu$ s and $\Delta\sigma$ s in all crustal earthquakes



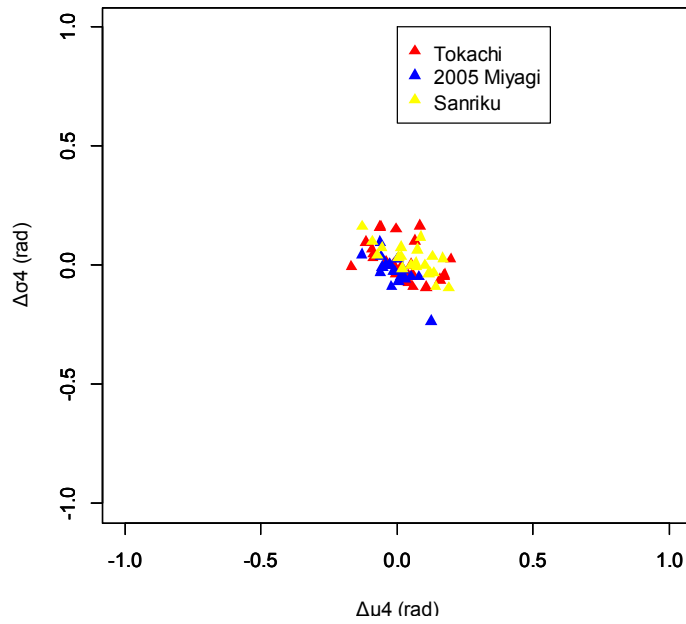
a) $\Delta\mu_1$ - $\Delta\sigma_1$ relation



b) $\Delta\mu_2$ - $\Delta\sigma_2$ relation

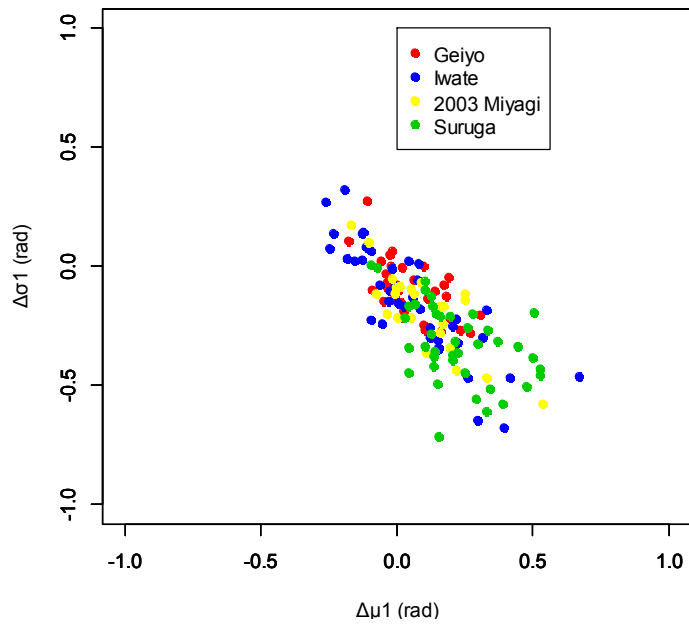


c) $\Delta\mu_3$ - $\Delta\sigma_3$ relation

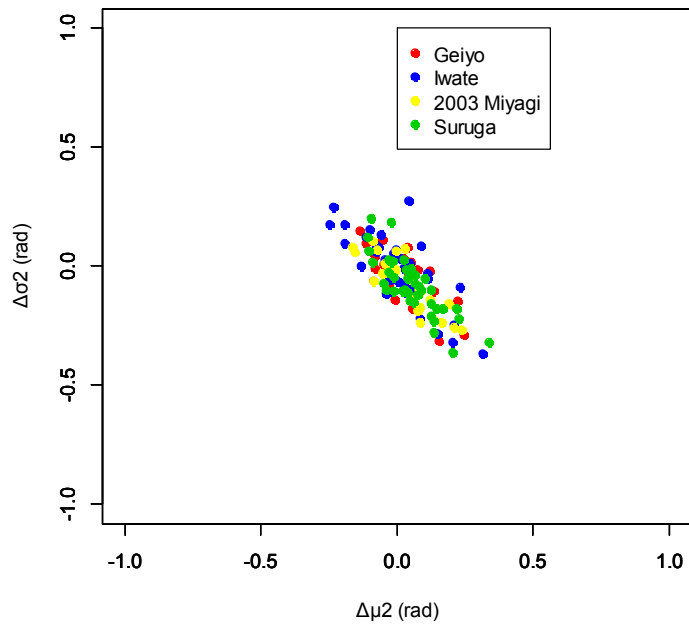


d) $\Delta\mu_4$ - $\Delta\sigma_4$ relation

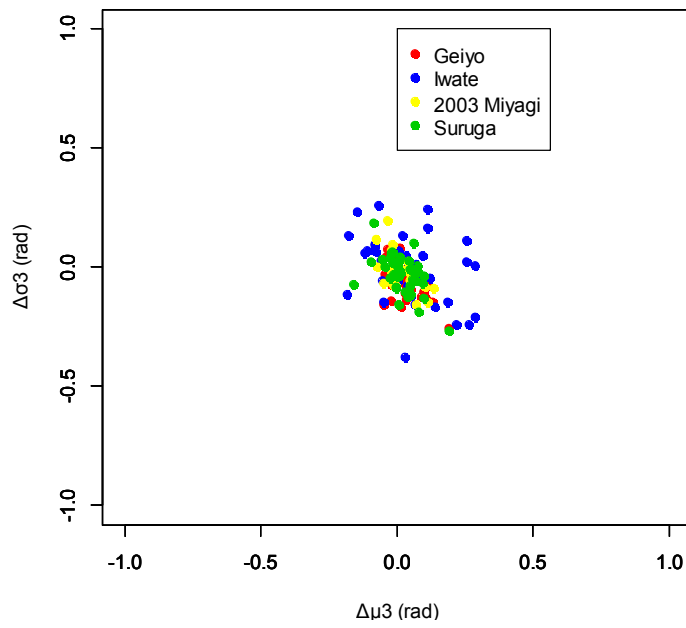
Fig.6.4: relation of $\Delta\mu$ s and $\Delta\sigma$ s in all interface earthquakes



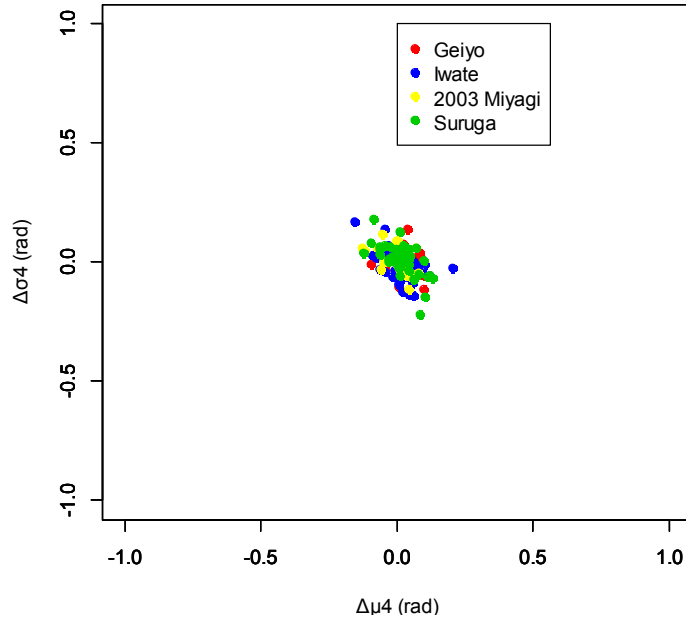
a) $\Delta\mu_1$ - $\Delta\sigma_1$ relation



b) $\Delta\mu_2$ - $\Delta\sigma_2$ relation



c) $\Delta\mu_3$ - $\Delta\sigma_3$ relation



d) $\Delta\mu_4$ - $\Delta\sigma_4$ relation

Fig.6.5: relation of $\Delta\mu$ s and $\Delta\sigma$ s in all intraplate earthquakes

以上の議論から各帯域の位相差分の統計量 $[\mu, \sigma, \beta_3, \beta_4]$ を次のようにした.

0.1 – 1.0 Hz: [-1.66, 0.743, -0.714, 5.23]

1.0 – 2.0 Hz: [-1.28, 0.365, -0.463, 6.34]

2.0 – 3.0 Hz: [-1.25, 0.315, -0.290, 6.57]

3.0 – 5.0 Hz: [-1.13, 0.278, -0.298, 6.99]

5.0 – 10.0 Hz: [-1.20, 0.307, -0.376, 7.03]

このように推定された統計量を持つ位相差分を, 多項式変換法を用いて各帯域で定義する (手順 7). そして最後に手順 8 で波形を作成する. この例では波形の後続部の振幅は小さいと考えられ, 因果性を満足するアルゴリズムをそのまま用いる. 繰り返し計算回数を 3 として, 波形を作成したところ, Fig.6.6 のようになった. Fig.6.7 にアルゴリズムを用いてぎざぎざさせた時のフーリエ振幅を Fig.6.2 のなめらかなフーリエ振幅と共に示す.

以上, 手順 1 において仮定した地震が発生した場合に, 設計地点で観測されると考えられる地震動を作成した. しかし前述のように, 実務では国土交通省の告示スペクトルが規定する応答スペクトルレベルを満たす地震動を作成する必要がある. そこで次の例として, Appendix.A, A.8 のプログラムを用い, 新潟県 (地震地域係数 $Z=0.9$) で稀に発生する地震動 (レベル 1) という条件での告示スペクトルと同レベルの応答スペクトルを有する波形を作成する. 用いる位相差分は上の手順 7 で定義されたもの, 最初に仮定するフーリエ振幅 F_k は Fig.6.2 と同じとする. 目標となる告示スペクトルを Fig.6.8 に示す.

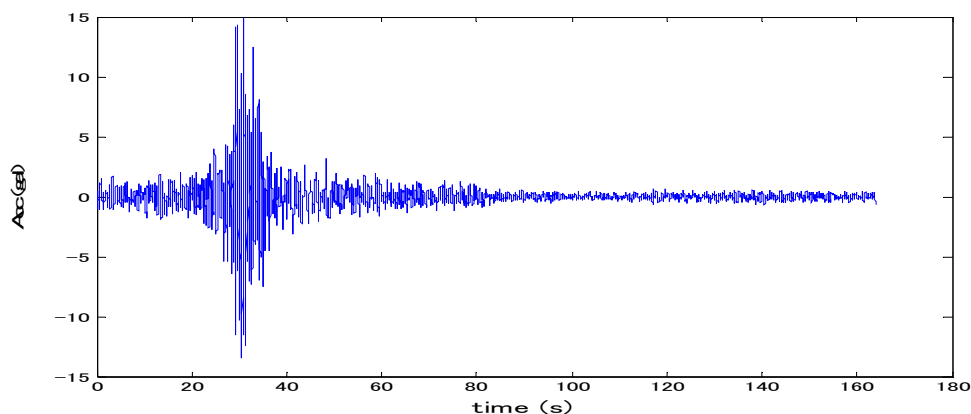


Fig.6.6: simulated ground motion in the first example

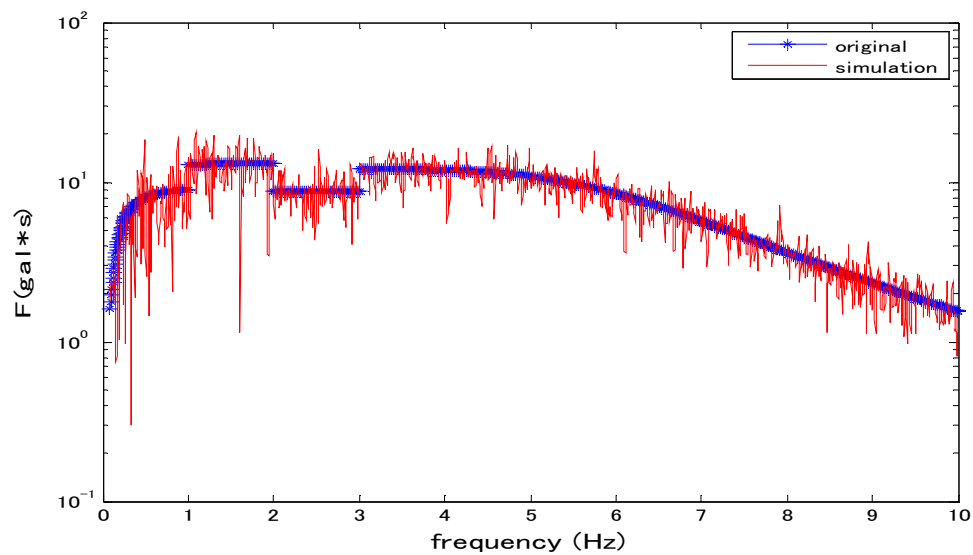


Fig.6.7: updated Fourier amplitude in the first example

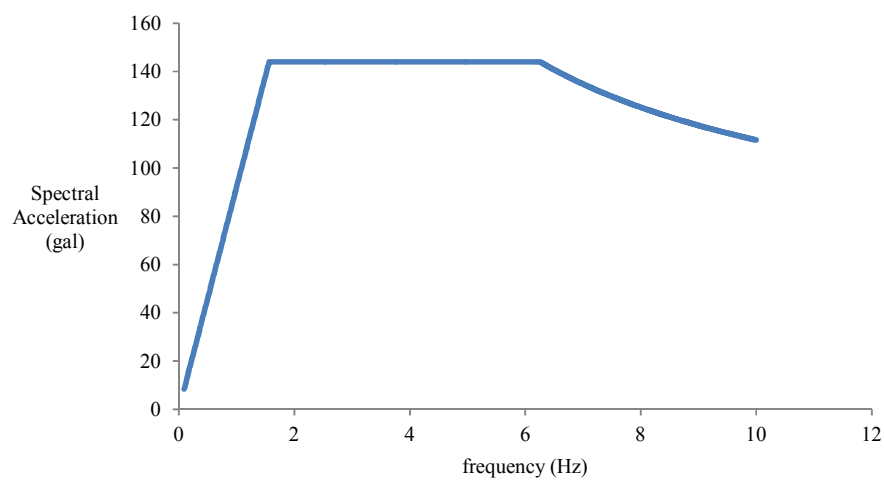


Fig.6.8: the design response spectrum in the second example

Appendix.A, A.8 のプログラムを繰り返し計算回数を 3 回として波形合成した. 作成された波形を Fig.6.9 に, その波形の応答スペクトルを告示スペクトルと重ね Fig.6.10 に示す. Fig.6.10 の二つの応答スペクトルは個々の周波数において差があるが, 平均的には同等の振幅を持っている.

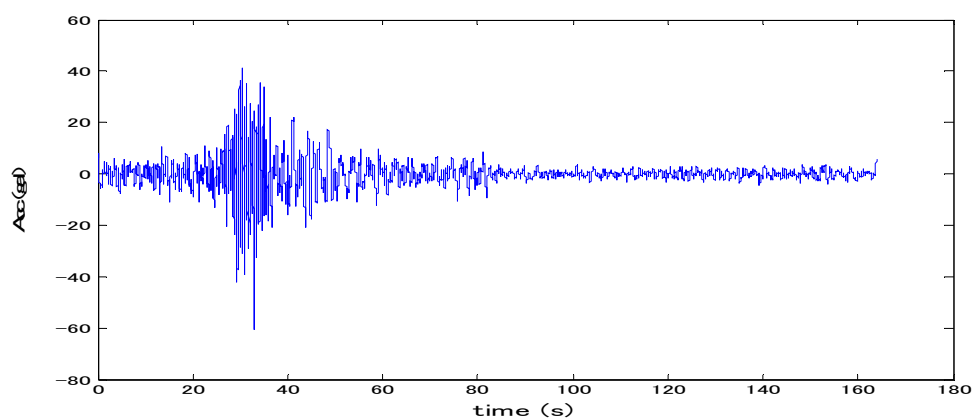


Fig.6.9: simulated ground motion in the second example

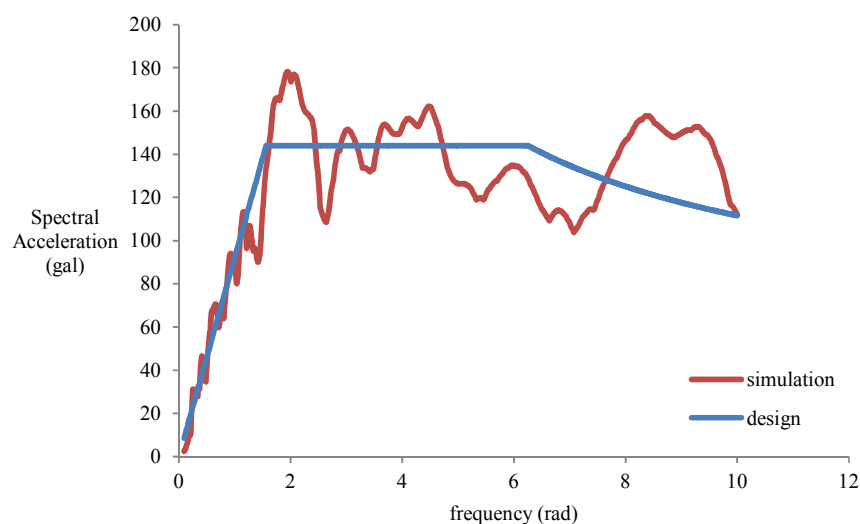


Fig.6.10: response spectrum of the ground motion case in Fig.6.9 and the design response spectrum in the second example

ここまで二つの波形作成例を示した。著者はさらに五つの例を想定し、波形作成を行った。想定した例の概要を最初の二つの例と共に Table.6.1 に示す。Table.6.1 を見れば分かるように地震のタイプや規模などの他に、設計地点が堆積層上にあるかどうか、告示スペクトルのレベル、震源から設計地点に至るまでの減衰の大小など、本論文のこれまでの議論を踏まえた上でなるべく多くの条件を想定した。なお各例の震源 (Hypocenter) は 1,2 が 2004 年新潟県中越地震, 3 が 2000 年鳥取県西部地震, 4 が 2003 年十勝沖地震, 5 が 2005 年宮城県沖地震, 6 が 2000 年芸予地震, 7 が 2009 年駿河湾の地震と同じである。

Table.6.1: examples for ground motion simulation in this thesis

#	Type	M _w	Depth (km)	Hypocenter	D (km)	Group	Fitting to the design spectrum?	On sedimentary layer?
1	crustal	6.6	10	Long. 138.87 Lat. 37.29	100	⁴ in all bands	No	No
2	crustal	6.6	10	Long. 138.87 Lat. 37.29	100	⁴ in all bands	Yes (with Level 1 and Z = 0.9)	No
3	crustal	6.6	10	Long. 133.35 Lat. 35.28	30	³ in all bands	No	No
4	interface	7.9	45	Long. 144.07 Lat. 41.78	150	⁵ in all bands	Yes (with Level 2 and Z = 1.0)	Yes
5	interface	7.1	45	Long. 142.28 Lat. 38.15	100	³ in all bands	No	No
6	intraplate	6.7	55	Long. 132.71 Lat. 34.12	80	⁴ in all bands	Yes (with Level 2 and Z = 0.9)	No
7	intraplate	6.2	25	Long. 138.50 Lat. 34.78	50	² in all bands	No	No

Table.6.1 の例 3 から 7 までの各ケースにおいて, 作成された模擬地震動を以下 Fig.6.11 から Fig.6.15 までに順に示す.

ここで, 例 4 だけは因果性を満たさない地震動を仮定している. Fig.6.12 の図から分かるように, 波形は長周期の大きな振幅を後続部に持ち, 堆積層上のサイトで観測されるような表面波らしい特性を備えている. その他の波形を見ていくと, 自然の地震動波形に比べて初動部の振幅がやや大きい. しかし Fig.6.13 と Fig.6.14 の波形は急激にピークに達しなだらかに減衰するという地震動らしい非対称な包絡形を持っている.

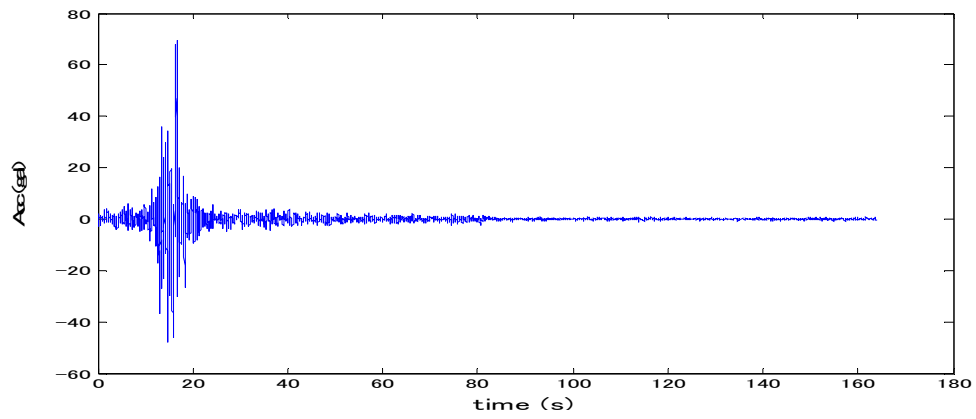


Fig.6.11: simulated ground motion in the third example

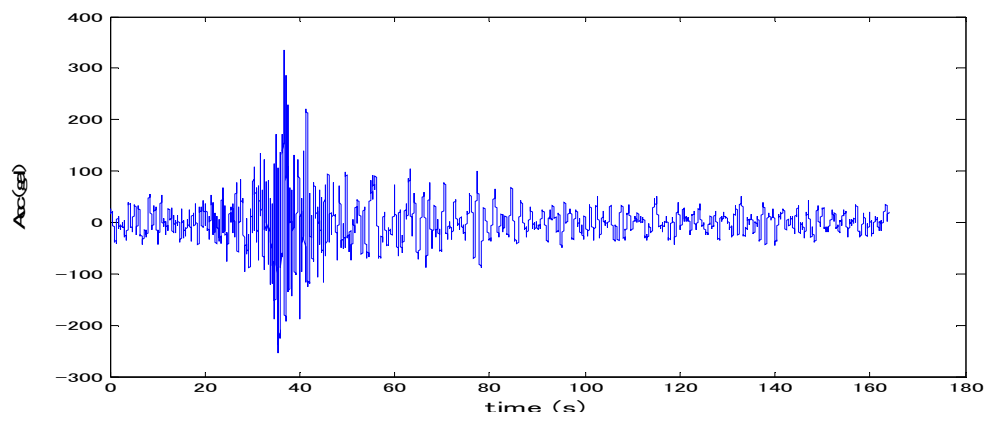


Fig.6.12: simulated ground motion in the fourth example

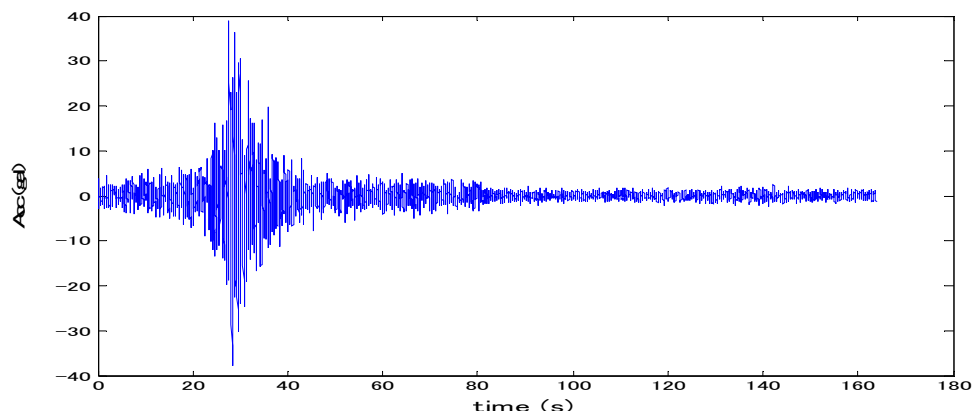


Fig.6.13: simulated ground motion in the fifth example

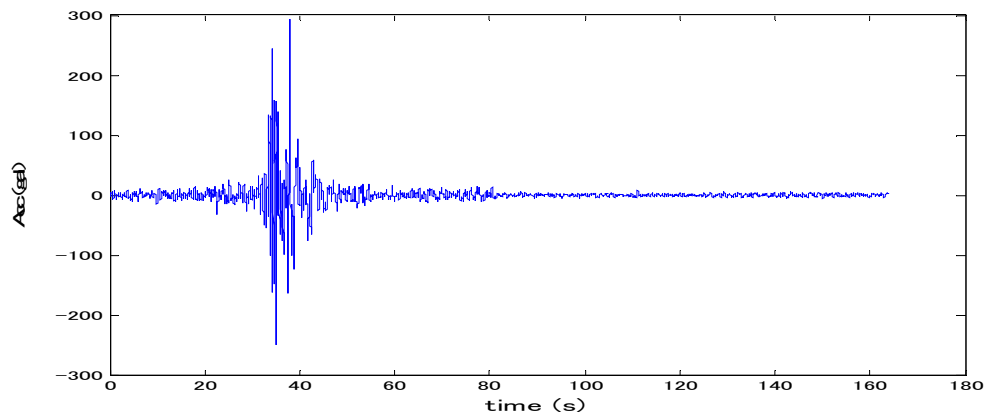


Fig.6.14: simulated ground motion in the sixth example

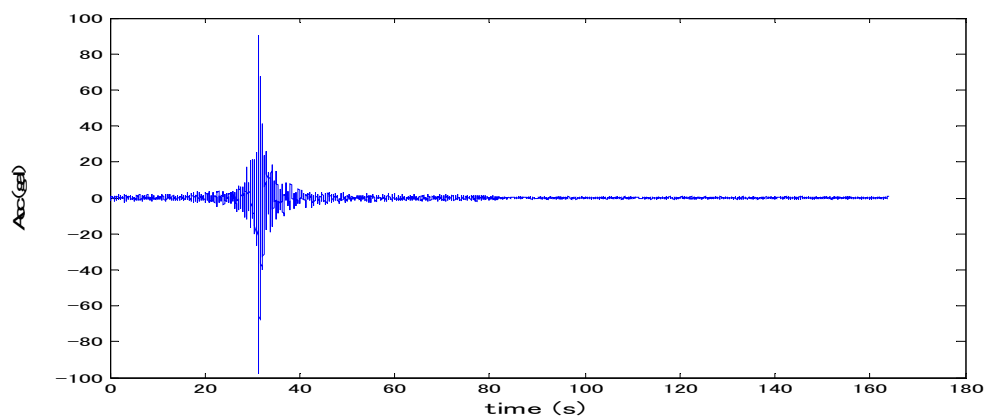


Fig.6.15: simulated ground motion in the seventh example

6.3 まとめ

本章では、本論文内でこれまで議論してきた内容を踏まえた模擬地震動作成手法を提案した。作成される波形は設計地点において予測されるエネルギーレベルを満足し、高次モーメントまで考慮された位相差分を持ち、継続時間が短い場合には因果性まで満足した地震波形である。また告示スペクトルが定める応答レベルを満足した波形を作成することも可能である。

6.2 節では提案した手法の手順に従い、地震のタイプや規模だけでなく、震源から設計地点までの減衰特性の違いや堆積層の上にあるかどうかなど、様々な条件を仮定して波形を作成した。

第六章の参考文献

- 1) Edgeworth, F.Y. (1898), “On the representation of statistics by mathematical formulae (Part I),
Journal of the Royal Statistical Society, **61**(4), pp. 670 – 700.
- 2) Choi, H. and J. Kanda (2003), “Translation method: A historical review and its application to
simulation of non-Gaussian stationary processes”, Wind and Structures, An international Journal **6**(5),
pp. 357 – 386.
- 3) 国土交通省：告示第 388 号、超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算
の基準を定める件、平成 13 年 3 月 30 日改正（建設省告示 1461 号、平成 12 年 5 月 31 日）、
2001.

7. 結論

本論文では標準偏差 σ および高次モーメント β_3 と β_4 の情報まで含んだ位相差分の統計量から模擬地震動を作成する手法を検討した。

第一章では本論文が執筆される前の既往の研究例を紹介し、位相差分やその σ および β_3 と β_4 の定義をした。次いで本論文で検討した地震を掲載した。

第二章では全帯域と細かい帯域における $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ それぞれの間の関係を調べた。そして β_3 の絶対値は σ が小さいほど大きい、 β_4 は σ が小さいほど非線形的に大きくなることを示した。また含まれる位相差分データ数が少ない帯域では β_3 の絶対値や β_4 が大きいことを述べた。

第三章では位相差分の β_3 と β_4 の値に大きな影響を与える位相差分の外れ値について検討した。まず位相差分が外れ値を取る周波数ではフーリエ振幅が小さいことを定量的に示し、外れ値を抜いた時の各地震における $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ それぞれの関係を調べた。その結果、地震毎に統計量の関係は異なり、その差も地震のマグニチュードや深さの違いによると思われる系統的なものではないと述べた。そのため本論文では個々の地震毎に、 $\sigma \cdot \beta_3 \cdot \beta_4$ の関係を定義することを提案した。

第四章では位相差分の σ の推定方法を議論した。既往の研究は σ を震源からの距離だけで説明しようとしているのに対して、本論文では $E.A.$ という指標を用いて σ を表す手法を提案した。その結果、 σ と $E.A.$ の勾配は地震のタイプ毎に基本的に異なる、3.0 Hz 以下の帯域では地震のマグニチュードや深さが σ と $E.A.$ の勾配に関与している可能性がある、逆にそれ以上の帯域ではこの二つの違いはそれほど σ と $E.A.$ の勾配に関与しない、そしてせん断波速度が 2000 m/s 以上の硬質な基盤が地表から 450 m 以上の深さにあるサイトとそうでないサイトでは 0.1 – 1.0 Hz での σ と $E.A.$ の勾配が異なる、などの知見を得た。

第五章では位相差分とフーリエ振幅の関係を論じた。地震動は記録の後半の振幅が小さければ因果関数と見なすことが可能であり、因果関数をフーリエ変換した時の実部と虚部の間にはヒルベルト変換の関係が成り立つことを基に、アルゴリズムを提案した。そのアルゴリズムは実務で用いるなめらかなスペクトルを位相差分の値を基に意図的にぎざぎざさせるというものである。

第六章は第二、三、四、五章の結果を基に模擬地震動作成手法のフローチャートを示した。実際にいくつかの例を想定して、波形作成を行った。

なおそれ以外の知見としては、5.3 節で示したように位相差分を高次モーメントまで考慮して作成された波形は、単に正規分布を位相差分として作成された波形より 3 Hz 以上の帯域においてスペクトル応答値が低減すること、また包絡形においては位相差分を高次モーメントまで考慮しても正規分布と仮定しても、それほど違いがないことが挙げられる。

APPENDIX

Appendix. A

ここでは、本論文内で解析に用いられたプログラムを掲載する。言語は Fortran 77 か Matlab を使用している。もちろん他の言語を用いても記述可能である。論文掲載という目的のため、著者が実際の検討において使用していたものと少々書式が異なる箇所があるが、機能・使用目的は全く同じである。以下、プログラムの概要を示す。以下、加速度波形のサンプリング周波数は 200 Hz、データ数は 32768 個という仮定のもと話を進める。

A.1: 0.1 – 10.0 Hz に含まれる位相差分を、その平均値周り $\pm \pi$ に収まるように操作してから μ ,

σ , β_3 , β_4 を算出する

A.2: 2.2 節で扱った 5 つの帯域に含まれる位相差分を、それぞれの帯域内でその平均値周り $\pm \pi$

に収まるように操作してから μ , σ , β_3 , β_4 を算出する

A.3: 2.2 節で扱った 5 つの帯域および 0.1 – 10.0 Hz に含まれる位相差分を対象に、外れ値を抜き

平均値周り $\pm \pi$ に収まるように操作してから μ , σ , β_3 , β_4 を算出する

A.4: Boore の加速度震源スペクトルを定義し、2.2 節で扱った 5 つの帯域に含まれるエネルギー

の平均値を算出する

A.5: 地盤の伝達関数を計算する。Appendix.B にある地盤情報とともに用いた

A.6: 2.2 節で扱った 5 つの帯域および 0.1 – 10.0 Hz にそれぞれにおいて $E.A.$ を計算する。波形は

NS 成分と EW 成分を入力するが、プログラムの途中でベクトル合成される

A.7: 検討する周波数帯域内で定義された位相差分から、なめらかなフーリエスペクトルを、因果

性を満足させるためにぎざぎざさせる

A.8: A7 のプログラムの改造版で、告示スペクトルが持つエネルギーレベルを保持しながら、因

果性を満たすためになめらかなフーリエスペクトルをぎざぎざさせる

```

C Program to compute mean, standard deviation, skewness and kurtosis values of phase difference in
C 0.1 – 10.0 Hz band assuming the number of data is 32768 and the sampling frequency is 200 Hz
C requires FAST.f defined by Ohsaki (1994) to be utilized
C Coded by Ke. Nagao
C
REAL X(32768)
COMPLEX C(32768)
REAL A(32768),B(32768),P(32768),Q(32768)
REAL E(32768),Z(32768),F(32768)
DATA NN/32768/

C open the input file (ground motion)
OPEN(1,FILE='INPUT.txt')
READ(1,*)(X(L),L=1,NN)
CLOSE(1)

C take Fourier transform
DO L=1,NN
    C(L)=COMPLEX(X(L),0.)
END DO
CALL FAST(NN,C,32768,-1)

C compute phase angles
DO K=1,NN
    C(K)=C(K)/REAL(NN)

```

```

A(K)=REAL(C(K))

B(K)=IMAG(C(K))

P(K)=ATAN2(-B(K),A(K))

IF (P(K).GT.0) THEN

P(K)=6.2832-P(K)

ELSE

P(K)=-P(K)

END IF

END DO

C  compute phase differences

DO K=1,NN-1

IF(P(K).GT.P(K+1)) THEN

Q(K)=P(K+1)-P(K)

ELSE

Q(K)=(P(K+1)-P(K))-6.2832

END IF

END DO

C  compute the mean and standard deviation values

WX=0.0

DO I=1,1638

WX=WX+Q(I)

END DO

AV=WX/1623

```

```

AV1=AV

DO K=16,1638

    E(K)=Q(K)

END DO

C

DO M=1,5

DO K=16,1638

    IF(E(K).LT.AV1-3.141593) THEN

        E(K)=E(K)+6.2832

    END IF

    IF(E(K).GT.AV1+3.141593) THEN

        E(K)=E(K)-6.2832

    END IF

END DO


WX1=0.0

VX1=0.0

DO I=16,1638

    WX1=WX1+E(I)

    VX1=VX1+E(I)*E(I)

END DO

AV1=WX1/1623

SD1=SQRT(VX1/1623-AV1*AV1)

V1=SD1**2

END DO

```

```
C  compute the skewness and kurtosis values
```

```
B3=0.0
```

```
B4=0.0
```

```
DO K=16,1638
```

```
B3=B3+((E(K)-AV1)**3)/1623/(V1**1.5)
```

```
B4=B4+((E(K)-AV1)**4)/1623/V1/V1
```

```
END DO
```

```
C
```

```
C  output results
```

```
OPEN(2,FILE='PD.csv')
```

```
WRITE(2,400)(Q(K),K=1,NN-1)
```

```
CLOSE(2)
```

```
OPEN(3,FILE='ST.csv')
```

```
WRITE(3,500) AV1,SD1,B3,B4
```

```
CLOSE(3)
```

```
400  FORMAT(3X,1F15.4)
```

```
500  FORMAT(3X,4F15.4)
```

```
END
```

A.1: Fortran 77 program to compute statistical values of phase difference in 0.1 – 10.0 Hz

```

C Program to compute mean, standard deviation, skewness and kurtosis values of phase difference in
C the 5 frequency bands in chapter 2.2 assuming the number of data is 32768 and the sampling
C frequency is 200 Hz
C requires FAST.f defined by Ohsaki (1994)

C Coded by Ke. Nagao

C
REAL X(32768)
COMPLEX C(32768)
REAL A(32768),B(32768),P(32768),Q(32768)
REAL E1(32768),E2(32768),E3(32768)
REAL E4(32768),E5(32768),Z(32768),F(32768)
DATA NN/32768/

C open the input file (ground motion)
OPEN(1,FILE='INPUT.txt')
READ(1,*)(X(L),L=1,NN)
CLOSE(1)

C take Fourier transform
DO L=1,NN
    C(L)=COMPLEX(X(L),0.)
END DO
CALL FAST(NN,C,32768,-1)

C compute phase angles

```

```

DO K=1,NN

  C(K)=C(K)/REAL(NN)

  A(K)=REAL(C(K))

  B(K)=IMAG(C(K))

  P(K)=ATAN2(-B(K),A(K))

  IF (P(K).GT.0) THEN

    P(K)=6.2832-P(K)

  ELSE

    P(K)=-P(K)

  END IF

END DO

```

C compute phase differences

```

DO K=1,NN-1

  IF(P(K).GT.P(K+1)) THEN

    Q(K)=P(K+1)-P(K)

  ELSE

    Q(K)=(P(K+1)-P(K))-6.2832

  END IF

END DO

```

C compute statistical values in 0.1 – 1.0 Hz band

```

W1=0.0

DO I=16,164

  W1=W1+Q(I)

```

```
END DO
```

```
AV=W1/149
```

```
AV1=AV
```

```
DO K=16,164
```

```
  E1(K)=Q(K)
```

```
END DO
```

C

```
DO M=1,8
```

```
DO K=16,164
```

```
  IF(E1(K).LT.AV1-3.141593) THEN
```

```
    E1(K)=E1(K)+6.2832
```

```
  END IF
```

```
  IF(E1(K).GT.AV1+3.141593) THEN
```

```
    E1(K)=E1(K)-6.2832
```

```
  END IF
```

```
END DO
```

```
WX1=0.0
```

```
VX1=0.0
```

```
DO I=16,164
```

```
  WX1=WX1+E1(I)
```

```
  VX1=VX1+E1(I)*E1(I)
```

```
END DO
```

```
AV1=WX1/149
```



```

SD1=SQRT(VX1/149-AV1*AV1)

V1=SD1**2

END DO
C
C  B31represents skewness and B41 represents kurotsis

B31=0.0

B41=0.0

DO K=16,164

    B31=B31 +((E1(K)-AV1)**3)/149/(V1**1.5)

    B41=B41+((E1(K)-AV1)**4)/149/V1/V1

END DO

C
C  compute statistical values in 1.0 – 2.0 Hz band

W2=0.0

DO I=165,328

    W2=W2+Q(I)

END DO

AVV=W2/164

AV2=AVV

DO K=165,328

    E2(K)=Q(K)

END DO

C

DO M=1,8

DO K=165,328

```

```

IF(E2(K).LT.AV2-3.141593) THEN

    E2(K)=E2(K)+6.2832

END IF

IF(E2(K).GT.AV2+3.141593) THEN

    E2(K)=E2(K)-6.2832

END IF

END DO

WX2=0.0
VX2=0.0
DO I=165,328
    WX2=WX2+E2(I)
    VX2=VX2+E2(I)*E2(I)
END DO
AV2=WX2/164
SD2=SQRT(VX2/164-AV2*AV2)
V2=SD2**2
END DO
C
C B32represents skewness and B42 represents kurotsis
B32=0.0
B42=0.0
DO K=165,328
    B32=B32 +((E2(K)-AV2)**3)/164/(V2**1.5)

```

```

      B42=B42+((E2(K)-AV2)**4)/164/V2/V2

      END DO

C
C  compute statistical values in 2.0 – 3.0 Hz band

      W3=0.0

      DO I=329,492

        W3=W3+Q(I)

      END DO

      AVVV=W3/164

      AV3=AVVV

      DO K=329,492

        E3(K)=Q(K)

      END DO

C

      DO M=1,8

      DO K=329,492

        IF(E3(K).LT.AV3-3.141593) THEN

          E3(K)=E3(K)+6.2832

        END IF

        IF(E3(K).GT.AV3+3.141593) THEN

          E3(K)=E3(K)-6.2832

        END IF

      END DO

      END DO

```

```

WX3=0.0

VX3=0.0

DO I=329,492

    WX3=WX3+E3(I)

    VX3=VX3+E3(I)*E3(I)

END DO

AV3=WX3/164

SD3=SQRT(VX3/164-AV3*AV3)

V3=SD3**2

END DO
C
C  B33represents skewness and B43 represents kurotsis

B33=0.0

B43=0.0

DO K=329,492

    B33= B33 +((E3(K)-AV3)**3)/164/(V3**1.5)

    B43= B43+((E3(K)-AV3)**4)/164/V3/V3

END DO
C
C  compute statistical values in 3.0 – 5.0 Hz band

W4=0.0

DO I=493,819

    W4=W4+Q(I)

END DO

AVVVV=W4/327

```

```
AV4=AVVVV
```

```
DO K=493,819
```

```
  E4(K)=Q(K)
```

```
END DO
```

C

```
DO M=1,8
```

```
DO K=493,819
```

```
  IF(E4(K).LT.AV4-3.141593) THEN
```

```
    E4(K)=E4(K)+6.2832
```

```
  END IF
```

```
  IF(E4(K).GT.AV4+3.141593) THEN
```

```
    E4(K)=E4(K)-6.2832
```

```
  END IF
```

```
END DO
```

```
WX4=0.0
```

```
VX4=0.0
```

```
DO I=493,819
```

```
  WX4=WX4+E4(I)
```

```
  VX4=VX4+E4(I)*E4(I)
```

```
END DO
```

```
AV4=WX4/327
```

```
SD4=SQRT(VX4/327-AV4*AV4)
```

```
V4=SD4**2
```

```

END DO

C
C  B34represents skewness and B44 represents kurotsis

B34=0.0

B44=0.0

DO K=493,819

  B34= B34 +((E4(K)-AV4)**3)/327/(V4**1.5)

  B44= B44+((E4(K)-AV4)**4)/327/V4/V4

END DO

C
C  compute statistical values in 5.0 – 10.0 Hz band

W5=0.0

DO I=820,1638

  W5=W5+Q(I)

END DO

AVVVVV=W5/819

AV5=AVVVVV

DO K=820,1638

  E5(K)=Q(K)

END DO

C

DO M=1,8

DO K=820,1638

  IF(E5(K).LT.AV5-3.141593) THEN

    E5(K)=E5(K)+6.2832

```

```

END IF

IF(E5(K).GT.AV5+3.141593) THEN

    E5(K)=E5(K)-6.2832

END IF

END DO

WX5=0.0

VX5=0.0

DO I=820,1638

    WX5=WX5+E5(I)

    VX5=VX5+E5(I)*E5(I)

END DO

AV5=WX5/819

SD5=SQRT(VX5/819-AV5*AV5)

V5=SD5**2

END DO
C
C  B35represents skewness and B45 represents kurotsis

B35=0.0

B45=0.0

DO K=820,1638

    B35= B35 +((E5(K)-AV5)**3)/819/(V5**1.5)

    B45= B45+((E5(K)-AV5)**4)/819/V5/V5

END DO
C
C  output results

```

```

OPEN(2,FILE='PD.csv')

WRITE(2,400)(Q(K),K=1,NN-1)

CLOSE(2)

OPEN(3,FILE='ST.csv')

WRITE(3,500) AV1,SD1,B31,B41,AV2,SD2,B32,B42,AV3,SD3,B33,B43,
1      AV4,SD4,B34,B44,AV5,SD5,B35,B45

      CLOSE(3)
400  FORMAT(3X,1F15.4)
500  FORMAT(3X,4F15.4)

END

```

A.2: Fortran 77 program to compute statistical values of phase difference in the 5 frequency bands in chapter 2.2


```

C Program to compute mean, standard deviation, skewness and kurtosis values of phase difference in
C the 5 frequency bands WITHOUT outliers assuming the number of data is 32768 and the
C sampling frequency is 200 Hz
C requires FAST.f defined by Ohsaki (1994)

C Coded by Ke. Nagao
C
REAL X(32768)
COMPLEX C(32768)
REAL A(32768),B(32768),P(32768),Q(32768)
REAL E(32768),Z(32768),F(32768)
DATA NN/32768/

C open the input file (ground motion)
OPEN(1,FILE='INPUT.txt')
READ(1,*)(X(L),L=1,NN)
CLOSE(1)

C take Fourier transform
DO L=1,NN
    C(L)=COMPLEX(X(L),0.)
END DO
CALL FAST(NN,C,32768,-1)

C compute phase angles
DO K=1,NN

```

```

C(K)=C(K)/REAL(NN)

A(K)=REAL(C(K))

B(K)=IMAG(C(K))

P(K)=ATAN2(-B(K),A(K))

IF (P(K).GT.0) THEN

P(K)=6.2832-P(K)

ELSE

P(K)=-P(K)

END IF

END DO

C  compute phase differences

DO K=1,NN-1

IF(P(K).GT.P(K+1)) THEN

Q(K)=P(K+1)-P(K)

ELSE

Q(K)=(P(K+1)-P(K))-6.2832

END IF

END DO

C

C  compute statistical values in 0.1 – 1.0 Hz band

W1=0.0

DO I=16,164

W1=W1+Q(I)

END DO

```

```
AV=W1/149
```

```
AV1=AV
```

```
DO K=16,164
```

```
  E1(K)=Q(K)
```

```
END DO
```

C

```
DO M=1,8
```

```
DO K=16,164
```

```
  IF(E1(K).LT.AV1-3.141593) THEN
```

```
    E1(K)=E1(K)+6.2832
```

```
  END IF
```

```
  IF(E1(K).GT.AV1+3.141593) THEN
```

```
    E1(K)=E1(K)-6.2832
```

```
  END IF
```

```
END DO
```

```
WX1=0.0
```

```
VX1=0.0
```

```
DO I=16,164
```

```
  WX1=WX1+E1(I)
```

```
  VX1=VX1+E1(I)*E1(I)
```

```
END DO
```

```
AV1=WX1/149
```

```
SD1=SQRT(VX1/149-AV1*AV1)
```

```

END DO

C  exclude outliers included in 0.1 – 1.0 Hz band

IC1=0

DO M=1,164

  IF(Q(M).GT.(AV1-4*SD1)) THEN

    IC1=IC1+1

    R1(IC1)=Q(M)

  END IF

END DO

Wq1=0.0

DO I=1,IC1

  Wq1=Wq1+R1(I)

END DO

AVq=Wq1/IC1

AVq1=AVq

C

C  compute mean and standard deviation in 0.1 – 1.0 Hz band

DO M=1,6

DO K=1,IC1

  IF(R1(K).LT.AVq1-3.141593) THEN

    R1(K)=R1(K)+6.2832

  END IF

  IF(R1(K).GT.AVq1+3.141593) THEN

```

```

R1(K)=R1(K)-6.2832

END IF

END DO

WXq1=0.0
VXq1=0.0
DO I=1,IC1
    WXq1=WXq1+R1(I)
    VXq1=VXq1+R1(I)*R1(I)
END DO

AVq1=WXq1/IC1
SDq1=SQRT(VXq1/IC1-AVq1*AVq1)
Vq1=SDq1**2
END DO
C
C B31represents skewness and B41 represents kurtosis
B31=0.0
B41=0.0
DO K=1,IC1
    B31=B31+((R1(K)-AVq1)**3)/IC1/(Vq1**1.5)
    B41=B41+((R1(K)-AVq1)**4)/IC1/Vq1/Vq1
END DO
C
C compute statistical values in 1.0 – 2.0 Hz band

```

```

W2=0.0

DO I=165,328

    W2=W2+Q(I)

END DO

AVV=W2/164

AV2=AVV

DO K=165,328

    E2(K)=Q(K)

END DO
C
DO M=1,8

DO K=165,328

    IF(E2(K).LT.AV2-3.141593) THEN

        E2(K)=E2(K)+6.2832

    END IF

    IF(E2(K).GT.AV2+3.141593) THEN

        E2(K)=E2(K)-6.2832

    END IF

END DO


WX2=0.0

VX2=0.0

DO I=165,328

    WX2=WX2+E2(I)

```

```

    VX2=VX2+E2(I)*E2(I)

END DO

AV2=WX2/164

SD2=SQRT(VX2/164-AV2*AV2)

END DO
C  exclude outliers included in 1.0 – 2.0 Hz band

IC2=0

DO M=1,328

    IF(Q(M).GT.(AV2-4*SD2)) THEN

        IC2=IC2+1

        R2(IC2)=Q(M)

    END IF

END DO

Wq2=0.0

DO I=1,IC2

    Wq2=Wq2+R2(I)

END DO

AVq=Wq2/IC2

AVq2=AVq
C  compute mean and standard deviation in 1.0 – 2.0 Hz band

DO M=1,6

DO K=1,IC2

    IF(R2(K).LT.AVq2-3.141593) THEN

```

```

R2(K)=R2(K)+6.2832

END IF

IF(R2(K).GT.AVq2+3.141593) THEN

R2(K)=R2(K)-6.2832

END IF

END DO


WXq2=0.0
VXq2=0.0
DO I=1,IC2
WXq2=WXq2+R2(I)
VXq2=VXq2+R2(I)*R2(I)
END DO


AVq2=WXq2/IC2
SDq2=SQRT(VXq2/IC2-AVq2*AVq2)
Vq2=SDq2**2
END DO
C
C B32represents skewness and B42 represents kurtosis
B32=0.0
B42=0.0
DO K=1,IC2
B32=B32+((R2(K)-AVq2)**3)/IC2/(Vq2**1.5)

```



```

      B42=B42+((R2(K)-AVq2)**4)/IC2/Vq2/Vq2

      END DO

C
C  compute statistical values in 2.0 – 3.0 Hz band

      W3=0.0

      DO I=329,492

        W3=W3+Q(I)

      END DO

      AVVV=W3/164

      AV3=AVVV

      DO K=329,492

        E3(K)=Q(K)

      END DO

C

      DO M=1,8

      DO K=329,492

        IF(E3(K).LT.AV3-3.141593) THEN

          E3(K)=E3(K)+6.2832

        END IF

        IF(E3(K).GT.AV3+3.141593) THEN

          E3(K)=E3(K)-6.2832

        END IF

      END DO

      END DO

```

```

WX3=0.0

VX3=0.0

DO I=329,492

    WX3=WX3+E3(I)

    VX3=VX3+E3(I)*E3(I)

END DO

AV3=WX3/164

SD3=SQRT(VX3/164-AV3*AV3)

END DO

```

C exclude outliers included in 2.0 – 3.0 Hz band

```

IC3=0

DO M=329,492

    IF(Q(M).GT.(AV3-4*SD3)) THEN

        IC3=IC3+1

        R3(IC3)=Q(M)

    END IF

END DO

```

```

Wq3=0.0

DO I=1,IC3

    Wq3=Wq3+R3(I)

END DO

```

```

AVq=Wq3/IC3

```

AVq3=AVq

C compute mean and standard deviation in 2.0 – 3.0 Hz band

DO M=1,6

DO K=1,IC3

IF(R3(K).LT.AVq3-3.141593) THEN

R3(K)=R3(K)+6.2832

END IF

IF(R3(K).GT.AVq3+3.141593) THEN

R3(K)=R3(K)-6.2832

END IF

END DO

WXq3=0.0

VXq3=0.0

DO I=1,IC3

WXq3=WXq3+R3(I)

VXq3=VXq3+R3(I)*R3(I)

END DO

AVq3=WXq3/IC3

SDq3=SQRT(VXq3/IC3-AVq3*AVq3)

Vq3=SDq3**2

END DO

C

C B33 represents skewness and B43 represents kurtosis

B33=0.0

B43=0.0

DO K=1,IC3

B33=B33+((R3(K)-AVq3)**3)/IC3/(Vq3**1.5)

B43=B43+((R3(K)-AVq3)**4)/IC3/Vq3/Vq3

END DO

C

C compute statistical values in 3.0 – 5.0 Hz band

W4=0.0

DO I=493,819

W4=W4+Q(I)

END DO

AVVVV=W4/327

AV4=AVVVV

DO K=493,819

E4(K)=Q(K)

END DO

C

DO M=1,8

DO K=493,819

IF(E4(K).LT.AV4-3.141593) THEN

E4(K)=E4(K)+6.2832

```

END IF

IF(E4(K).GT.AV4+3.141593) THEN

    E4(K)=E4(K)-6.2832

END IF

END DO


WX4=0.0
VX4=0.0
DO I=493,819
    WX4=WX4+E4(I)
    VX4=VX4+E4(I)*E4(I)
END DO
AV4=WX4/327
SD4=SQRT(VX4/327-AV4*AV4)
END DO

C  exclude outliers included in 3.0 – 5.0 Hz band

IC4=0
DO M=493,819
    IF(Q(M).GT.(AV4-4*SD4)) THEN
        IC4=IC4+1
        R4(IC4)=Q(M)
    END IF
END DO

```

```

Wq4=0.0

DO I=1,IC4

    Wq4=Wq4+R4(I)

END DO


AVq=Wq4/IC4
AVq4=AVq

C  compute mean and standard deviation in 3.0 – 5.0 Hz band

DO M=1,6

DO K=1,IC4

    IF(R4(K).LT.AVq4-3.141593) THEN

        R4(K)=R4(K)+6.2832

    END IF

    IF(R4(K).GT.AVq4+3.141593) THEN

        R4(K)=R4(K)-6.2832

    END IF

END DO


WXq4=0.0
VXq4=0.0

DO I=1,IC4

    WXq4=WXq4+R4(I)

    VXq4=VXq4+R4(I)*R4(I)

```

```
END DO
```

```
AVq4=WXq4/IC4
```

```
SDq4=SQRT(VXq4/IC4-AVq4*AVq4)
```

```
Vq4=SDq4**2
```

```
END DO
```

```
C
```

```
C B34 represents skewness and B44 represents kurtosis
```

```
B34=0.0
```

```
B44=0.0
```

```
DO K=1,IC4
```

```
    B34=B34+((R4(K)-AVq4)**3)/IC4/(Vq4**1.5)
```

```
    B44=B44+((R4(K)-AVq4)**4)/IC4/Vq4/Vq4
```

```
END DO
```

```
C
```

```
C compute statistical values in 5.0 – 10.0 Hz band
```

```
W5=0.0
```

```
DO I=820,1638
```

```
    W5=W5+Q(I)
```

```
END DO
```

```
AVVVVV=W5/819
```

```
AV5=AVVVVV
```

```
DO K=820,1638
```

```
    E5(K)=Q(K)
```

```
END DO
```

C

DO M=1,8

DO K=820,1638

IF(E5(K).LT.AV5-3.141593) THEN

E5(K)=E5(K)+6.2832

END IF

IF(E5(K).GT.AV5+3.141593) THEN

E5(K)=E5(K)-6.2832

END IF

END DO

WX5=0.0

VX5=0.0

DO I=820,1638

WX5=WX5+E5(I)

VX5=VX5+E5(I)*E5(I)

END DO

AV5=WX5/819

SD5=SQRT(VX5/819-AV5*AV5)

END DO

C exclude outliers included in 5.0 – 10.0 Hz band

IC5=0

DO M=820,1638


```
IF(Q(M).GT.(AV5-4*SD5)) THEN
```

```
    IC5=IC5+1
```

```
    R5(IC5)=Q(M)
```

```
END IF
```

```
END DO
```

```
Wq5=0.0
```

```
DO I=1,IC5
```

```
    Wq5=Wq5+R5(I)
```

```
END DO
```

```
AVq=Wq5/IC5
```

```
AVq5=AVq
```

C compute mean and standard deviation in 5.0 – 10.0 Hz band

```
DO M=1,8
```

```
DO K=1,IC5
```

```
    IF(R5(K).LT.AVq5-3.141593) THEN
```

```
        R5(K)=R5(K)+6.2832
```

```
    END IF
```

```
    IF(R5(K).GT.AVq5+3.141593) THEN
```

```
        R5(K)=R5(K)-6.2832
```

```
    END IF
```

```
END DO
```

```
WXq5=0.0
```

```
VXq5=0.0
```

```
DO I=1,IC5
```

```
    WXq5=WXq5+R5(I)
```

```
    VXq5=VXq5+R5(I)*R5(I)
```

```
END DO
```

```
AVq5=WXq5/IC5
```

```
SDq5=SQRT(VXq5/IC5-AVq5*AVq5)
```

```
Vq5=SDq5**2
```

```
END DO
```

C

C B35 represents skewness and B45 represents kurtosis

```
B35=0.0
```

```
B45=0.0
```

```
DO K=1,IC5
```

```
    B35=B35+((R5(K)-AVq5)**3)/IC5/(Vq5**1.5)
```

```
    B45=B45+((R5(K)-AVq5)**4)/IC5/Vq5/Vq5
```

```
END DO
```

C compute statistical values in 0.1 – 10.0 Hz band

```
W6=0.0
```

```
DO I=16,1638
```

```
    W6=W6+Q(I)
```

```
END DO
```

```
AVVVVVV=W6/1623
```

```
AV6=AVVVVVV
```

```
DO K=16,1638
```

```
  E6(K)=Q(K)
```

```
END DO
```

C

```
DO M=1,8
```

```
DO K=16,1638
```

```
  IF(E6(K).LT.AV6-3.141593) THEN
```

```
    E6(K)=E6(K)+6.2832
```

```
  END IF
```

```
  IF(E6(K).GT.AV6+3.141593) THEN
```

```
    E6(K)=E6(K)-6.2832
```

```
  END IF
```

```
END DO
```

```
WX6=0.0
```

```
VX6=0.0
```

```
DO I=16,1638
```

```
  WX6=WX6+E6(I)
```

```
  VX6=VX6+E6(I)*E6(I)
```

```
END DO
```

```
AV6=WX6/1623
```

```
SD6=SQRT(VX6/1623-AV6*AV6)
```

END DO

C exclude outliers included in 0.1 – 10.0 Hz band

IC6=0

DO M=1,1638

IF(Q(M).GT.(AV6-4*SD6)) THEN

IC6=IC6+1

R6(IC6)=Q(M)

END IF

END DO

Wq6=0.0

DO I=1,IC6

Wq6=Wq6+R6(I)

END DO

AVq=Wq6/IC6

AVq6=AVq

C compute mean and standard deviation in 0.1 – 10.0 Hz band

DO M=1,8

DO K=1,IC6

IF(R6(K).LT.AVq6-3.141593) THEN

R6(K)=R6(K)+6.2832

END IF

```

IF(R6(K).GT.AVq6+3.141593) THEN

    R6(K)=R6(K)-6.2832

END IF

END DO

WXq6=0.0
VXq6=0.0
DO I=1,IC6
    WXq6=WXq6+R6(I)
    VXq6=VXq6+R6(I)*R6(I)
END DO

AVq6=WXq6/IC6
SDq6=SQRT(VXq6/IC6-AVq6*AVq6)
Vq6=SDq6**2
END DO
C
C B36 represents skewness and B46 represents kurtosis
B36=0.0
B46=0.0
DO K=1,IC6
    B36=B36+((R6(K)-AVq6)**3)/IC6/(Vq6**1.5)
    B46=B46+((R6(K)-AVq6)**4)/IC6/Vq6/Vq6
END DO
C

```

```

C  output results

OPEN(2,FILE='PD.csv')

WRITE(2,400)(Q(K),K=1,NN-1)

CLOSE(2)
400  FORMAT(3X,1F15.4)

OPEN(3,FILE='ST.csv')

WRITE(3,500) AVq1,SDq1,SS1,S1,AVq2,SDq2,SS2,S2,AVq3,SDq3,
1      SS3,S3,AVq4,SDq4,SS4,S4,AVq5,SDq5,SS5,S5,
1      AVq6,SDq6,SS6,S6
500  FORMAT(3X,24F14.4)

CLOSE(3)

END

```

A.3: Fortran 77 program to compute statistical values of phase difference in the 5 frequency bands in chapter 2.2 without outliers

```

C Program to compute Boore's sources spectrum
C
C Coded by Ke. Nagao

DIMENSION F1(32768),F2(32768),W(32768)
DIMENSION T(32768),U(32768),SA(32768)
DATA NN/32768/
PARAMETER (PI=3.14159265)

C These parameters can be changed according to the moment magnitude, rupture type, and so on
DATA FS/2.0/,RTF/0.63/,PR/1.0/
DATA Bz/3.0/,Pz/2.6/
DATA B/3.4/,P/2.7/,S/8/
DATA FM/6.0/,F0/0.1/
DATA SM/7./

C compute seismic moment
C note that for the later computation, its value is multiplied by 10^-20
SMO=10**((SM+10.7)*1.5-20)

C compute the other coefficients
COEF=RTF*FS*PR/4/PI/(B**3)/P
R=SQRT(B*P/Bz/Pz)

C define circler frequency
W(1)=0.0
DO M=2,NN
  W(M)=((M-1)/163.84)*2.0*PI
END DO

C compute the source spectrum (0.1 – 10.0Hz)
DO M=16,1639
  T(M)=W(M)**2/(1+(W(M)/2.0/PI/F0)**2)
  U(M)=(1+(W(M)/2.0/PI/FM)**S)**(-0.5)
  SA(M)=COEF*R*SMO*T(M)*U(M)
END DO

C compute the average energy in 0.1 – 1.0 Hz
E1=0.0
DO M=16,164
  E1=E1+SA(M)**2
END DO
ER1=E1/(164+1-16)

C compute the average energy in 1.0 – 2.0 Hz
E2=0.0
DO M=165,328
  E2=E2+SA(M)**2
END DO

```

```

ER2=E2/164

C  compute the average energy in 2.0 – 3.0 Hz
E3=0.0
DO M=329,492
  E3=E3+SA(M)**2
END DO
ER3=E3/164

C  compute the average energy in 3.0 – 5.0 Hz
E4=0.0
DO M=493,819
  E4=E4+SA(M)**2
END DO
ER4=E4/327

C  compute the average energy in 5.0 – 10.0 Hz
E5=0.0
DO M=820,1638
  E5=E5+SA(M)**2
END DO
ER5=E5/819

C  compute the average energy in 0.1 – 10.0 Hz
E6=0.0
DO M=16,1638
  E6=E6+SA(M)**2
END DO
ER=E6/1623

C  output
OPEN(1,FILE='ER.txt')
WRITE(1,8)ER1,ER2,ER3,ER4,ER5,ER6
8  FORMAT(F15.0)

END

```

A.4: Fortran 77 program to compute Boore's acceleration source spectrum


```

%Program to compute the transfer function
%Coded by Ke. Nagao

clear a,clear b,clear e,clear f
clear R,clear c,clear g,clear L,clear Lref,clear UW,clear VS,clear TH
clear G,clear Ga,clear pc,clear alpha,clear theta1,clear theta2
clear All,clear Bll,clear a11,clear a12,clear a21,clear a22,clear b11,clear b12,clear b21,clear b22

%define number of layers (L) and the reference layer (Lref)
L=7;Lref=6;

%define the damping ratio
h1=0.0;

%define the unit weight, shear velocity and thicknesses of layers
UW=[2.15 2.15 2.15 2.15 2.15 2.15 2.35]
VS=[230 230 450 540 930 1100 2100]
TH=[4 14 12 56 14 355]

%compute the impedance ratios
for j=1:L
    G(j)=UW(j)/9.8*VS(j)*VS(j);
    Ga(j)=G(j)*(1+i*2*h1);
    pc(j)=i*sqrt(UW(j)/9.8/Ga(j));
end
for j=1:L-1
    alpha(j)=Ga(j)*pc(j)/Ga(j+1)/pc(j+1);
end
alpha%impedance ratio

%define the circular frequency
w(1)=0.0;
for j=2:32768
    w(j)=w(j-1)+200/32768*6.2832;
end

%transfer function from the bottom layer to the ground surface
for j=1:32768
    for h=1:L-1
        theta1(h,j)=-w(j)*TH(h)/VS(h);
        theta2(h,j)=w(j)*TH(h)/VS(h);
        a11(h,j)=0.5*(1+alpha(h))*(cos(theta1(h,j))+i*sin(theta1(h,j)));
        a12(h,j)=0.5*(1-alpha(h))*(cos(theta2(h,j))+i*sin(theta2(h,j)));
        a21(h,j)=0.5*(1-alpha(h))*(cos(theta1(h,j))+i*sin(theta1(h,j)));
        a22(h,j)=0.5*(1+alpha(h))*(cos(theta2(h,j))+i*sin(theta2(h,j)));

        All(2*j-1,2*h-1)=a11(h,j);
        All(2*j-1,2*h)=a12(h,j);
        All(2*j,2*h-1)=a21(h,j);
        All(2*j,2*h)=a22(h,j);
    end
end

```

```

end
end

for j=n1:n2
    a=[All(2*j-1,1),All(2*j-1,2);All(2*j,1),All(2*j,2)];
    for h=1:L-2
        b=[All(2*j-1,2*h+1),All(2*j-1,2*h+2);All(2*j,2*h+1),All(2*j,2*h+2)];
        a=b*a;
    end
    c(j)=2/abs(a(1,1)+a(1,2));
end

%transfer function from the top of the reference layer to the ground surface
for j=1:32768
    for h=1:Lref-1
        theta1(h,j)=-w(j)*TH(h)/VS(h);
        theta2(h,j)=w(j)*TH(h)/VS(h);
        b11(h,j)=0.5*(1+alpha(h))*(cos(theta1(h,j))+i*sin(theta1(h,j)));
        b12(h,j)=0.5*(1-alpha(h))*(cos(theta2(h,j))+i*sin(theta2(h,j)));
        b21(h,j)=0.5*(1-alpha(h))*(cos(theta1(h,j))+i*sin(theta1(h,j)));
        b22(h,j)=0.5*(1+alpha(h))*(cos(theta2(h,j))+i*sin(theta2(h,j)));

        Bll(2*j-1,2*h-1)=b11(h,j);
        Bll(2*j-1,2*h)=b12(h,j);
        Bll(2*j,2*h-1)=b21(h,j);
        Bll(2*j,2*h)=b22(h,j);
    end
end

for j=n1:n2
    e=[Bll(2*j-1,1),Bll(2*j-1,2);Bll(2*j,1),Bll(2*j,2)];
    for h=1:Lref-2
        f=[Bll(2*j-1,2*h+1),Bll(2*j-1,2*h+2);Bll(2*j,2*h+1),Bll(2*j,2*h+2)];
        e=f*e;
    end
    g(j)=2/abs(e(1,1)+e(1,2));
end

%transfer function from the bottom layer to the top of the reference layer
for j=1:32768
    R(j)=c(j)/g(j);
end
%output
Fid=fopen('TRANSF.txt','wt');
fprintf(Fid,'%15.4f',R(1:32768));

```

A.5: Matlab program to compute transfer function

```

C Program to compute the Energy Attenuation in each frequency band
C requires FPAC.f defined by Ohsaki (1994)
C Coded by Ke. Nagao
C
  DIMENSION T(32768),U(32768),SA(32768)
  DIMENSION X1(60000),X2(60000),Y(60000)
  DIMENSION W1(60000),W2(60000),Z(60000)
  DIMENSION F(60000),G(60000),R(60000)
  DIMENSION ER(6),TRANS(60000)
  DATA NN/32768/
  REAL MAX

C read the energy of the Boore's source spectrum in each frequency band
OPEN(3,FILE='ER.txt')
READ(3,*)(ER(M),M=1,6)
CLOSE(3)

C input two horizontal records (NS and EW)
OPEN(1,FILE='NS.txt')
READ(1,*)(X1(M),M=1,NN)
CLOSE(1)

OPEN(2,FILE='EW.txt')
READ(2,*)(X2(M),M=1,NN)
CLOSE(2)

C find the strongest axis for the two horizontal records and combine them (becomes Z)
DO M=1,NN
  Y(M)=SQRT(X1(M)**2+X2(M)**2)
END DO

MAX=Y(1)
NUM=1
DO M=2,NN
  IF(Y(M).GT.MAX) THEN
    MAX=Y(M)
    NUM=M
  END IF
END DO

IF((X1(NUM).GT.0.0).AND.(X2(NUM).GT.0.0)) THEN GO TO 11
11 P=ATAN(X2(NUM)/X1(NUM))
DO I=1,NN
  W1(I)=X1(I)*COS(P)
  W2(I)=X2(I)*COS(3.141593/2-P)
END DO
END IF

IF((X1(NUM).LT.0.0).AND.(X2(NUM).GT.0.0)) THEN GO TO 12
12 P=3.141593+ATAN(X2(NUM)/X1(NUM))

```

```

DO I=1,NN
W1(I)=X1(I)*COS(P)
W2(I)=X2(I)*COS(P-3.141593/2)
END DO
END IF

IF((X1(NUM).LT.0.0).AND.(X2(NUM).LT.0.0)) THEN GO TO 13
13  P=ATAN(X2(NUM)/X1(NUM))
    DO I=1,NN
    W1(I)=X1(I)*COS(P)
    W2(I)=X2(I)*COS(3.141593/2-P)
    END DO
    END IF

IF((X1(NUM).GT.0.0).AND.(X2(NUM).LT.0.0)) THEN GO TO 14
14  P=-ATAN(X2(NUM)/X1(NUM))
    DO I=1,NN
    W1(I)=-X1(I)*COS(P)
    W2(I)=X2(I)*COS(3.141593/2-P)
    END DO
    END IF

DO M=1,NN
  Z(M)=W1(M)+W2(M)
END DO

C  compute the Fourier amplitude of Z
DT=0.005
CALL FPAC(NN,Z,32768,DT,111,F,G,R,32768,NFOLD,DF)

C  read the transfer function defined in 0.1 – 10.0 Hz
OPEN(5,FILE='TRANSF.txt')
READ(5,*)(TRANS(M),M=16,1639)
CLOSE(5)

C  the Fourier amplitude of Z is divided by the transfer function to eliminate the site amplification
DO M=16,1639
  F(M)=F(M)/TRANS(M)
END DO

C  compute the energy in each frequency band
C  0.1-1.0Hz
E1=0.0
DO M=16,164
  E1=E1+F(M)**2
END DO
ES1=E1/149

C  1.0-2.0Hz
E2=0.0

```

```

DO M=165,328
  E2=E2+F(M)**2
END DO
ES2=E2/164

C 2.0-3.0Hz
E3=0.0
DO M=329,492
  E3=E3+F(M)**2
END DO
ES3=E3/164

C 3.0-5.0Hz
E4=0.0
DO M=493,819
  E4=E4+F(M)**2
END DO
ES4=E4/327

C 5.0-10.0Hz
E5=0.0
DO M=820,1638
  E5=E5+F(M)**2
END DO
ES5=E5/819

C 0.1-10.0Hz
E6=0.0
DO M=16,1638
  E6=E6+F(M)**2
END DO
ES6=E6/1623

C compute EA's
EA1=ES1/ER(1)
EA2=ES2/ER(2)
EA3=ES3/ER(3)
EA4=ES4/ER(4)
EA5=ES5/ER(5)
EA6=ES6/ER(6)

OPEN(4,FILE='EA.csv')
WRITE(4,23)EA1,EA2,EA3,EA4,EA5,EA6
23 FORMAT(6F25.15)

END

```

A.6: Fortran 77 program to compute E.A. in each frequency band

```

%Program to update Fourier amplitude using the information of defined phase differences
%to satisfy the Hilbert transform's relation between the real and imaginary parts of the Fourier
%complex series and to maintain the energy of the initial Fourier amplitude in the interested
%frequency band
% Coded by Ke. Nagao

%define the interested frequency band
k1=16;
k2=1638;%these k1 and k2 values indicate the interested frequency band
        %is 0.1 - 10.0 Hz in this example for the sampling frequency = 200 Hz and N = 32768

%define frequency
freq(1)=0.0;
for i=2:16385
    freq(i)=freq(i-1)+200/32768;
end

%input the initial Fourier amplitude
load('F.txt','-ascii');

F1=F*200;% this 200 is the sampling frequency

%define phase differences
Q(1:k1-1)=randn(k1-1,1);
load('PD.txt','-ascii'); %PD has 1623 phase difference data i.e. 0.1 – 10.0 Hz
Q(k1:k2)=PD;
Q(k2+1:16384)=randn(16384-k2,1);

%compute phase angles
P(1)=0.0;
for i=2:16385
    P(i)=mod(P(i-1)+Q(i-1),6.2832);
end

%start iteration
for i=1:10
%define A (cosine function) and B (sine function)
for i=1:16385
A(i)=F1(i)*cos(P(i));
B(i)=F1(i)*sin(P(i));
end

%compute B1 by taking the Hilbert transform of A
B1=-imag(hilbert(A));

%compute correlation of B and B1 in the interested frequency band
corrcoef(B(k1:k2),B1(k1:k2))

clear F2;
F2=F1;

```

```

for i=1:16385
    Fn(i)=sqrt(A(i)^2+B1(i)^2);
end

%compute R
clear R
R=sum(F1(k1:k2).^2)/sum(Fn(k1:k2).^2)

for i=1:16385
    Fn(i)=Fn(i)*sqrt(R);
end
F1=Fn;
end
%terminate iteration

```

%F2 is the estimated Fourier amplitude from the defined phase differences

A.7: Matlab program to update Fourier amplitude maintaining the energy of the initial Fourier amplitude in each frequency band

```

%Program to update Fourier amplitude using the information of defined phase differences
%to satisfy the Hilbert transform's relation between the real and imaginary parts of the Fourier
%complex series and to ensure that the energy of the response spectrum for the simulated ground motion
%is comparable to that of the target response spectrum in the interested frequency band
% Coded by Ke. Nagao

%define the interested frequency band
k1=16;
k2=1638; %these k1 and k2 values indicate the interested frequency band
          %is 0.1 - 10.0 Hz in this example for the sampling frequency = 200 Hz and N = 32768

%define frequency and period
freq(1)=0.0;
for i=2:16385
    freq(i)=freq(i-1)+200/32768;
    T(i)=freq(i)^-1;
end

%input the initial Fourier amplitude
load('F.txt','-ascii');

F1=F*200;% this 200 is sampling frequency

%define phase differences
Q(1:k1-1)=randn(k1-1,1);
load('PD.txt','-ascii'); %PD has 1623 phase difference data i.e. 0.1 – 10.0 Hz
Q(k1:k2)=PD;
Q(k2+1:16384)=randn(16384-k2,1);

%compute phase angles
P(1)=0.0;
for i=2:16385
    P(i)=mod(P(i-1)+Q(i-1),6.2832);
end

%start iteration
for i=1:3
    %define A (cosine function) and B (sine function)
    for i=1:16385
        A(i)=F1(i)*cos(P(i));
        B(i)=F1(i)*sin(P(i));
    end

    %compute B1 by taking the Hilbert transform of A
    B1=-imag(hilbert(A));

    %compute correlation of B and B1 (denoted by B* in this thesis) in the interested frequency band
    corrcoef(B(k1:k2),B1(k1:k2))

clear F2;

```



```

F2=F1;
for i=1:16385
    Fn(i)=sqrt(A(i)^2+B1(i)^2);
End

%inverse Fourier transform to generate simulated ground motion DDY
for i=1:16385
    C(i)=complex(Fn(i)*cos(P(i)),Fn(i)*sin(P(i)));
end
clear DDY
for i=16386:32768
    C(i)=conj(C(32770-i));
end
DDY=real(iff(C));

%compute response spectrum (below is based on Ohsaki (1994)'s ERES.f)
clear RES;
D=0.05;%the damping ratio of 0.05

DT=0.005;%time step is 0.005 sec

IND=1;%IND=1:acceleration response spectrum, IND=2:velocity response spectrum,
    %IND=3:displacement response spectrum

kk1=16;kk2=1639;%these kk1 and kk2 values indicate the interested frequency band
    %is 0.1 - 10.0 Hz in the response spectrum

for K=kk1:kk2
    W=6.2832/T(K);
    W2=W*W;
    DW=D*W;
    WD=W*sqrt(1.-D^2);
    WDT=WD*DT;
    E=exp(-DW*DT);
    CWDT=cos(WDT);
    SWDT=sin(WDT);
    A11= E*(CWDT+DW*SWDT/WD);
    A12= E*SWDT/WD;
    A21=-E*W2*SWDT/WD;
    A22= E*(CWDT-DW*SWDT/WD);
    SS=-DW*SWDT-WD*CWDT;
    CC=-DW*CWDT+WD*SWDT;
    S1=(E*SS+WD)/W2;
    C1=(E*CC+DW)/W2;
    S2=(E*DT*SS+DW*S1+WD*C1)/W2;
    C2=(E*DT*CC+DW*C1-WD*S1)/W2;
    S3=DT*S1-S2;
    C3=DT*C1-C2;
    B11=-S2/WDT;
    B12=-S3/WDT;

```

```

B21=(DW*S2-WD*C2)/WDT;
B22=(DW*S3-WD*C3)/WDT;
RMAX(1)=2.*DW*abs(DDY(1))*DT;
RMAX(2)=abs(DDY(1))*DT;
RMAX(3)=0.;
DXF=-DDY(1)*DT;
XF=0.;
for M=2:length(DDY)
DDYM=DDY(M);
DDYF=DDY(M-1);
X= A12*DXF+A11*XF+B12*DDYM+B11*DDYF;
DX=A22*DXF+A21*XF+B22*DDYM+B21*DDYF;
DDX=-2.*DW*DX-W2*X;

if RMAX(1) >= abs(DDX)
    RMAX(1)=RMAX(1);
else
    RMAX(1)=abs(DDX);
end

if RMAX(2) >= abs(DX)
    RMAX(2)=RMAX(2);
else
    RMAX(2)=abs(DX);
end

if RMAX(3) >= abs(X)
    RMAX(3)=RMAX(3);
else
    RMAX(3)=abs(X);
end

DXF=DX;
XF=X;
RES(K)=RMAX(IND);
end
end

%compute R
clear R
R=27390992/ sum(RES(kk1:kk2).^2); %R: the energy of the design spectrum to the energy of response
                                %spectrum of simulated ground motion ratio in the interested
                                %frequency band. This 27390992 is energy included in 0.1 – 10.0
                                %Hz for the design response spectrum with Level 1 and Z = 0.9

for i=1:16385
    Fn(i)=Fn(i)*sqrt(R);
end
F1=Fn;
End

```

```
%terminate iteration
```

```
%F2 is the estimated Fourier amplitude from the defined
```

```
%phase differences
```

A.8: Matlab program to update Fourier amplitude so that the response spectrum of the simulated ground motion has the same energy as the design response spectrum

Appendix. B

ここでは本論文第四章で, KiK-net の地中観測計がせん断波速度 2000 m/s の硬質な地盤上にない場合に, 仮定した地盤構成を掲載する. 著者は J-SHIS の深部地盤情報を基に KiK-net の地中観測計がある層からせん断波速度が 2000 m/s を初めて超える点に至るまでの地層の構成を調べた.

各データの見方であるが, 表の上部には KiK-net の観測点コード (例えば”AKTH01”) と観測点名 (例えば”西木北”) が示されている. そして表の第一列目には各層の厚さ(m), 二列目にはせん断波速度 (m/s), 三列目には単位体積重量 (ton/m³) が明記されている. 各表の一番左にある線の上の”KiK-net”という表示は, KiK-net の地中観測計がその線が引かれている場所に設置されていることを表している.

層の数, 観測計が置かれている層の番号, 各層の厚さ(m), せん断波速度 (m/s), 単位体積重量 (ton/m³) を Appendix.A の A.5 内で定義すれば, 各サイトにおけるせん断波速度が 2000 m/s を初めて超える点から KiK-net の地中観測計がある点までの伝達関数を算出できる. これらの表は KiK-net の観測点コードのアルファベット順に並んでいる.

KiK-net	AKTH01	西木北
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	200	2
14	430	2.1
34	680	2.2
36	850	2.2
14	1200	2.2
36	1200	2.2
61	1400	2.25
	2100	2.35

KiK-net	AKTH02	西木南
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
5.2	250	1.8
50.8	900	2.2
44	1080	2.2
52	1080	2.2
152	1400	2.25
242	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	AKTH03	矢島
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
1	180	2
3	260	2
12	260	2
38	460	2.2
50	640	2.2
655	1400	2.25
	2100	2.35

KiK-net	AKTH04	東成瀬
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	150	2.2
8	430	2.2
12	980	2.2
38	1150	2.2
30	1500	2.25
112	1500	2.25
181	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	AKTH14	鹿角
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
10	100	1.9
80	690	2.2
18	1270	2.2
15	1400	2.2
	2100	2.35

KiK-net	AKTH16	西仙北
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	180	1.95
40	450	2
22	520	2
72	610	2
16	740	2
180	740	2
60	1100	2.2
606	1400	2.25
	2100	2.35

KiK-net	KiK-net	AKTH17	中仙
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	200	1.9
	4	310	1.9
	22	310	1.9
	26	550	1.9
	20	460	1.95
	76	670	1.95
	25	920	1.95
	183	920	1.95
	273	1400	2.2
	91	1700	2.25
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	AKTH18	大森
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	200	2.2
	10	350	2.2
	88	580	2.2
	21	580	2.2
	121	1100	2.25
	152	1700	2.3
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	AKTH19	湯沢
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	110	1.6
	10	200	1.95
	48	500	1.95
	70	750	1.95
	50	860	1.95
	138	1100	2.2
	76	1700	2.3
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	FKSH03	高郷
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	3	150	1.7
	5	280	1.9
	10	410	1.9
	52	510	2
	26	450	2.15
	16	730	2.15
	15	850	2.15
	273	1100	2.2
	76	1700	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	FKSH04	会津高田
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	120	2
	8	210	2
	13	300	2.1
	59	690	2.1
	62	800	2.1
	62	1000	2.2
KiK-net	60	1200	2.2
	230	1200	2.2
		2100	2.35

	KiK-net	FKSH05	下郷
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	240	2.05
	4	240	2.05
	6	450	2.05
	42	1500	2.2
	10	1100	2.2
KiK-net	40	1400	2.2
	15	1400	2.2
		2100	2.35

	KiK-net	FKSH20	浪江
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	28	350	2.2
	28	500	2.2
KiK-net	53	610	2.2
	315	1100	2.25
	75	1350	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	GNMH08	嬭恋
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	8	250	2.05
	12	380	2.05
	34	400	2.1
	20	500	2.1
	20	410	2.1
	24	460	2.1
	14	710	2.1
KiK-net	18	1000	2.2
	100	1000	2.2
	576	1500	2.25
		2700	2.5

KiK-net	HDKH01	平取西
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	120	1.7
4	360	2
8	500	2.1
12	620	2.1
22	1200	2.2
50	1400	2.2
35	1400	2.25
455	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	HDKH03	門別東
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
5	160	1.9
13	540	2.05
12	540	2.1
18	840	2.1
32	1200	2.15
25	1400	2.2
100	1400	2.2
	2700	2.5

KiK-net	HDKH04	門別西
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	140	1.6
22	240	1.9
14	540	1.9
30	750	1.9
50	690	1.9
100	860	1.9
20	860	2
1000	1100	2.25
1000	1400	2.3
2000	1700	2.35
	2100	2.4

KiK-net	HDKH06	静内
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
10	280	1.7
8	460	2
18	610	2
48	790	2
30	980	2.2
140	1100	2.2
1500	1400	2.25
1580	1700	2.3
	2600	2.35

KiK-net	KiK-net	HDKH07	様似
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	190	1.6
	16	440	1.9
	16	650	2.2
	14	650	2.2
	56	900	2.2
	35	1400	2.25
	15	1700	2.3
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	IBUH02	穂別
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	130	1.9
	3	280	2.1
	15	810	2.1
	20	930	2.1
	24	1130	2.1
	38	1360	2.25
	20	1400	2.25
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	IBUH03	厚真
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	60	2
	16	90	2
	10	190	2.1
	12	320	2.1
	12	210	2.1
	24	320	2.1
	56	430	2.1
	20	520	2.1
	332	520	2.1
	1212	1100	2.2
	727	1400	2.25
	1697	1700	2.3
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	ISKH01	珠洲
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	8	240	1.9
	76	410	1.9
	116	630	1.9
	12	630	1.9
	106	1100	2.2
	30	1400	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	ISKH02	柳田
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	420	1.9
	72	810	2.25
KiK-net	26	530	2.25
	156	1400	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	ISKH07	金沢
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	15	440	1.9
	35	440	1.9
	40	630	1.9
	70	1090	1.9
	140	960	2
	320	750	2.1
KiK-net	182	1080	2.1
	107	1100	2.1
	879	1700	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	ISKH09	尾口
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	170	1.9
	18	300	1.9
	34	620	1.9
KiK-net	54	930	2.15
	220	1000	2.15
	170	1300	2.2
	380	1600	2.25
		1900	2.25

	KiK-net	IWTH01	二戸東
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	170	2.1
	6	280	2.2
	110	850	2.2
	36	760	2.2
KiK-net	44	1300	2.2
	421	1300	2.2
		2100	2.35

KiK-net	IWTH06	二戸西
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	80	2
4	320	2.2
26	750	2.2
24	1140	2.2
16	530	2.2
28	750	2.2
324	750	2.2
152	1100	2.2
61	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	IWTH11	一戸
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	130	1.9
8	540	1.9
8	540	1.9
30	370	2
50	1290	2.2
88	930	2.2
112	1080	2.2
276	1100	2.2
45	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	IWTH15	矢巾
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	150	2.2
8	360	2.2
26	450	2.2
72	540	2.2
12	680	2.2
680	1400	2.25
	2100	2.35

KiK-net	IWTH16	雫石
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	260	1.9
20	560	1.9
58	630	2.15
40	740	2.15
30	1160	2.15
350	1160	2.15
30	1400	2.2
30	1700	2.3
	2100	2.35

	KiK-net	IWTH19	花巻北
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	170	1.8
	4	550	2.2
	24	700	2.2
	32	770	2.2
	20	990	2.2
KiK-net	16	1270	2.2
	80	1270	2.2
	258	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	IWTH20	花巻南
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	110	1.6
	16	350	2
	28	300	2
	46	560	2.05
KiK-net	64	430	2
	455	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	IWTH24	金ヶ崎
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	180	1.8
	8	480	1.8
	38	590	1.8
	8	300	1.95
	34	550	1.75
	28	600	2
KiK-net	32	540	2.05
	32	540	2.05
	273	1100	2.2
	500	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	IWTH25	一関西
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	6	430	1.6
	28	530	1.7
	30	680	2
	48	1120	2
	64	1780	2.2
	28	1380	2.1
KiK-net	56	1810	2.25
	330	1810	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	IWTH26	一関東
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	130	2
	6	460	2.15
	26	540	2.2
KiK-net	72	680	2.2
	225	1100	2.2
	212	1400	2.25
	697	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	KNGH20	松田
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	9	120	1.95
	53	600	2.1
	20	890	2.2
KiK-net	24	1400	2.2
	303	1400	2.2
		2700	2.5

	KiK-net	KSRH01	阿寒北
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	100	1.7
	14	150	1.7
	16	540	1.9
	20	190	1.9
	14	240	1.9
KiK-net	40	380	1.9
	150	1100	2.2
	250	1400	2.3
	100	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	KSRH02	阿寒南
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	90	1.6
	8	140	1.6
	8	250	1.8
	12	470	1.8
	10	290	1.8
KiK-net	65	400	1.9
	180	1100	2.2
	390	1400	2.3
	450	1700	2.35
		2100	2.35

	KiK-net	KSRH03	標茶北
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	90	1.65
	4	190	1.7
	10	250	1.9
	18	380	1.85
	22	670	1.85
	26	530	1.9
KiK-net	25	440	1.9
	287	500	1.9
	850	1100	2.2
	500	1400	2.3
	50	1700	2.35
		2100	2.4

	KiK-net	KSRH04	標茶南
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	8	100	1.9
	10	280	1.9
	12	280	1.9
	48	350	1.9
KiK-net	160	470	1.9
	258	1100	2.2
		2700	2.5

	KiK-net	KSRH05	鶴居西
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	100	1.9
	24	700	1.9
	26	700	1.9
	32	490	1.9
	58	580	1.9
	136	670	1.9
KiK-net	50	800	1.9
	65	800	1.9
	820	1100	2.25
	500	1400	2.3
	360	1700	2.35
		2100	2.4

	KiK-net	KSRH06	鶴居東
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	90	1.9
	14	340	1.9
	14	490	1.9
	40	370	1.9
	100	540	1.9
KiK-net	70	660	1.9
	1000	1100	2.2
	330	1400	2.3
		2100	2.4

	KiK-net	KSRH07	鶴居南
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	100	1.9
	2	140	1.9
	8	140	1.9
	68	450	1.9
KiK-net	140	510	1.9
	580	1100	2.2
	210	1400	2.25
		2100	2.3

	KiK-net	KSRH08	白糠北
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	120	1.6
	4	790	1.9
	6	790	1.95
	20	1070	1.95
	6	410	1.95
	16	1150	1.95
KiK-net	46	1250	2
	20	1700	2.2
		2100	2.35

	KiK-net	KSRH09	白糠南
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	6	90	1.9
	4	220	1.9
	30	440	1.9
	32	460	1.9
KiK-net	28	530	1.9
	80	530	1.9
	150	1100	2.2
	150	1400	2.25
	150	1700	2.3
		2100	2.3

	KiK-net	MYGH05	小野田
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	120	2
	4	560	2
	14	300	2.2
	16	360	2.2
	50	470	2.15
	84	780	2.15
	90	960	2.2
	34	1080	2.2
KiK-net	43	690	2.2
	276	1100	2.2
	758	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	MYGH06	田尻
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	86	690	2.2
KiK-net	14	1480	2.25
	763	1500	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	MYGH08	岩沼
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	70	590	1.9
	14	760	2.2
KiK-net	14	970	2.25
	142	1100	2.25
	364	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	MYGH09	白石
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	150	2
	4	360	2
	14	360	2.2
	18	490	2.2
	42	770	2.2
KiK-net	20	840	2.2
	188	1100	2.2
	424	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	MYGH10	山元
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	1	110	1.8
	2	250	1.8
	31	390	2
	80	590	2.2
KiK-net	91	770	2.2
	280	1100	2.2
	182	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	NGNH28	戸隠
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	120	1.8
	5	560	1.8
KiK-net	113	900	2.15
	1090	1100	2.15
		2100	2.35

	KiK-net	NGNH29	野沢温泉
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	3	150	1.7
	7	400	1.8
	80	740	1.9
KiK-net	20	1040	2.1
	587	1100	2.1
	1300	1500	2.25
	242	1700	2.3
	455	1900	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	NGSH05	高来
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	200	1.9
	8	320	1.9
	10	320	2.2
	122	800	2.2
	32	1400	2.2
KiK-net	26	880	2.2
	1209	1100	2.2
		2100	2.35

	KiK-net	NIGH01	長岡
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
KiK-net	100	620	1.9
	80	620	1.9
	245	1000	2.1
	425	1280	2.2
	1030	1588	2.25
		2000	2.3

	KiK-net	NIGH02	朝日
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	150	2.1
	30	400	2
	28	550	2
KiK-net	45	600	2.25
	105	600	2.25
	150	1000	2.25
	210	1300	2.25
	370	1600	2.25
	300	1900	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	NIGH03	荒川
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	26	250	2
	36	400	2
	80	530	1.9
KiK-net	90	580	1.9
	85	580	1.9
	200	1000	2.1
	350	1300	2.2
	1050	1550	2.3
		1900	2.35

	KiK-net	NIGH04	関川
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	50	480	2.15
	30	570	2.15
KiK-net	20	660	2.15
	20	1800	2.25
		2200	2.3

	KiK-net	NIGH05	聖籠
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	65	290	1.8
KiK-net	80	410	1.9
	550	550	1.9
	500	1000	2.1
	700	1300	2.2
	800	1600	2.25
		2000	2.3

	KiK-net	NIGH06	加茂
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
KiK-net	10	270	1.9
	90	740	2.1
	50	1100	2.2
	580	1600	2.2
		1900	2.3

	KiK-net	NIGH07	村松
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
KiK-net	4	200	1.9
	6	350	1.9
	8	730	2
	42	1380	2
	45	1600	2.15
	75	1800	2.2
		2200	2.25

	KiK-net	NIGH11	川西
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
KiK-net	2	200	1.6
	54	400	1.85
	7	700	1.8
	22	520	2
	100	650	2.1
	20	850	2.15
	460	1000	2.15
	910	1300	2.2
	910	1600	2.25
		1900	2.3

	KiK-net	NIGH12	湯の谷
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
KiK-net	14	500	1.95
	36	730	1.95
	60	780	2.1
	70	1300	2.25
	30	1600	2.25
		1900	2.3

	KiK-net	NIGH14	塩沢
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
KiK-net	14	320	1.5
	6	560	1.9
	30	710	2.1
	44	840	2.1
	74	950	2.1
	196	1200	2.25
	25	1330	2.25
	155	1330	2.25
		2700	2.5

	KiK-net	NIGH15	六日
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
KiK-net	16	560	1.8
	12	1000	2.15
	16	630	2.2
	14	900	2.2
	22	1250	2.25
	20	1540	2.35
	20	1540	2.35
		2100	2.5

KiK-net	NIGH17	妙高高原
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	220	1.9
12	420	1.9
16	680	2.2
8	620	2.2
12	500	2.2
26	680	2.2
48	760	2.2
24	870	2.2
486	1100	2.2
200	1400	2.3
	2100	2.4

KiK-net	NIGH18	妙高
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	170	1.9
18	300	1.9
34	620	1.9
54	930	2.15
220	1000	2.15
170	1300	2.2
380	1600	2.25
	1900	2.3

KiK-net	NMRH04	別海東
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	100	1.6
4	160	1.7
12	160	1.8
18	260	1.8
60	290	1.8
48	320	1.8
40	370	1.85
30	410	1.95
57	500	1.95
1000	1100	2.15
1090	1400	2.25
	2100	2.35

KiK-net	NMRH05	別海西
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	130	1.7
4	190	1.9
12	190	2
40	350	2
100	390	2
60	540	2
356	540	2
788	1100	2.2
409	1400	2.25
182	1700	2.3
	2100	2.35

	KiK-net	SRCH10	夕張
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	480	2
	12	1150	2.2
	118	1340	2.2
KiK-net	66	1600	2.2
	255	1600	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	SZOH26	袋井
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	7	210	1.95
	18	320	1.95
	56	520	2
	112	590	2
	96	670	2
	30	780	2.1
KiK-net	130	1700	2.25
	95	1700	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	SZOH34	清水北
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	150	1.8
	6	290	1.8
	18	600	2
	10	700	2.05
	50	960	2.1
KiK-net	32	1100	2.1
	106	1450	2.2
	1242	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	SZOH36	藤枝
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	2	200	1.95
	5	500	1.95
	17	900	2
	42	1100	2.1
	18	1400	2.15
KiK-net	16	1600	2.2
	810	1700	2.25
		2100	2.35

	KiK-net	SZOH37	芝川
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	5	100	1.9
	5	500	1.95
	20	910	2
	110	1250	2.1
	80	1400	2.2
KiK-net	84	1400	2.2
	200	1500	2.25
	606	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	SZOH39	西伊豆西
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	10	180	1.9
	12	690	2.1
	12	1200	2.15
KiK-net	70	1500	2.2
	335	1500	2.2
		2100	2.35

	KiK-net	SZOH41	南伊豆
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	6	270	1.85
	24	890	2
	42	1100	2.2
KiK-net	37	1400	2.2
	285	1500	2.25
		2700	2.35

	KiK-net	SZOH42	修善寺
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	5	50	1.65
	25	260	1.9
	40	630	1.9
	70	690	1.9
KiK-net	63	970	2
	120	1500	2.2
		2700	2.5

KiK-net	SZOH43	清水南
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	100	1.6
4	300	1.6
9	300	1.6
15	510	1.6
30	750	1.95
60	820	1.95
60	780	2
60	1080	2.2
170	1100	2.2
60	1400	2.25
394	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	TCGH09	矢板
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
6	180	2
18	720	2.15
80	1050	2.2
60	1050	2.2
394	1500	2.3
	2700	2.5

KiK-net	TCGH11	今市
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	80	1.8
10	280	2
6	420	2.05
8	650	2.1
14	1030	2.15
110	1480	2.2
50	1600	2.3
148	1600	2.3
	2700	2.5

KiK-net	TKCH01	陸別
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
4	170	1.9
8	440	1.9
48	700	1.9
60	860	1.9
30	860	1.9
180	1100	2.2
210	1400	2.25
120	1700	2.3
	2100	2.35

	KiK-net	TKCH02	足寄東
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	140	1.9
	20	590	1.9
KiK-net	80	1070	2.1
	230	1100	2.1
	150	1400	2.25
	150	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	TKCH03	足寄西
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	120	2
	10	450	2.1
	30	640	2.1
	58	750	2.1
	12	520	2.1
KiK-net	85	970	2.1
	180	1100	2.1
	380	1400	2.2
	240	1700	2.25
		2100	2.3

	KiK-net	TCKH04	新得南
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	380	2.05
	16	380	2.05
	18	680	2.05
	46	890	2.05
KiK-net	85	1020	2.1
	60	1400	2.25
	60	1700	2.3
		2100	2.35

	KiK-net	TCKH05	本別
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	140	1.6
	2	140	1.9
	12	430	1.95
	12	660	2
	50	770	2
KiK-net	20	640	2
	20	640	2
	300	1100	2.2
	515	1400	2.25
	700	1700	2.3
		2100	2.35

KiK-net	TCKH06	芽室
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	130	2
2	330	2
44	330	1.95
66	390	2
46	480	2
67	650	2
515	1100	2.2
167	1400	2.25
30	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	TCKH07	豊頃
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	80	1.65
2	110	1.65
10	110	1.65
24	200	1.8
10	350	1.95
50	530	1.9
180	1100	2.2
400	1400	2.25
330	1700	2.3
	2100	2.35

KiK-net	TYMH04	魚津
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
14	600	1.9
46	730	1.9
40	530	1.9
6	530	1.9
364	1100	2.1
333	1700	2.25
	2700	2.5

KiK-net	TYMH05	井波
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
2	200	1.9
14	620	1.9
14	920	2.15
30	920	2.15
22	920	2.15
62	1060	2.15
98	1100	2.15
909	1700	2.25
	2700	2.5

KiK-net	TYMH06	八尾
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
90	570	1.9
110	780	1.9
27	780	1.9
288	1100	2.1
606	1700	2.25
	2700	2.5

KiK-net	YMNH11	大月
thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
12.5	230	1.9
19	370	1.9
36.5	1010	2.2
132	1530	2.2
72	1530	2.2
	2700	2.5

KiK-net	KiK-net	YMNH12	増穂
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	10	240	2.1
	11	750	2.1
	35	840	2.1
	29	1130	2.2
	63	1350	2.25
	185	1350	2.25
	106	1400	2.25
	182	1500	2.25
	803	1700	2.3
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	YMNH13	身延
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	250	2
	6	900	2.2
	20	1300	2.25
	30	1360	2.25
	60	1320	2.25
	84	1350	2.25
	68	1400	2.25
	182	1500	2.25
	2121	1700	2.3
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	YMNH15	上九一色
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	6	200	2.2
	38	1100	2.2
	40	1300	2.2
	32	1600	2.25
	1545	1700	2.3
		2700	2.35

KiK-net	KiK-net	YMTH08	八幡
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	120	2.15
	6	320	2.15
	18	470	2.15
	42	610	2.15
	36	680	2.15
	718	1100	2.15
		2700	2.5

KiK-net	KiK-net	YMTH09	戸沢
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	120	2.1
	6	260	2.1
	22	430	2.1
	12	720	2.1
	156	1050	2.1
	40	1050	2.1
	881	1400	2.25
		2100	2.35

KiK-net	KiK-net	YMTH15	西川東
	thickness (m)	Vs (m/s)	unit weight (ton/m ³)
	4	230	2.15
	14	230	2.15
	12	450	2.15
	56	540	2.15
	14	930	2.15
	355	1100	2.15
		2100	2.35

Appendix. C

ここでは本論文第四章で $E.A.$ の計算に用いた観測点の名称, KiK-net のコード名, 経度・緯度, そして震源距離 D (km) を Table.1.1 の地震毎に順に掲載している. 各表内におけるサイトの並びは震源距離 D の小さい順である. 基本的には各地震において震央距離 (震源距離ではない) 100 km 程度に位置する観測点を解析対象にしたが, 2003 年十勝沖地震, 2005 年宮城県沖地震, 2011 年三陸沖地震の三つに関してはそれぞれ震央距離 200 km, 150 km, 200 km 程度の観測点まで考慮した.

Table.C.1: sites considered for *E.A.* calculations in 2000 Tottoriken seibu earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
日野	TTRH02	133.39	35.23	13
伯太	SMNH01	133.26	35.3	14
仁多	SMNH02	133.09	35.22	27
神郷	OKYH07	133.32	35.05	28
美保関	SMNH10	133.3	35.56	33
湯原	OKYH09	133.68	35.18	34
赤崎	TTRH04	133.63	35.47	35
哲多	OKYH08	133.41	34.91	43
北房	OKYH14	133.62	34.94	46
吉田	SMNH12	132.86	35.16	48
平田	SMNH11	132.8	35.43	54
上斎原	OKYH10	133.93	35.28	54
口和	HRSH06	132.91	34.91	58
佐田	SMNH03	132.72	35.22	59
建部	OKYH05	133.85	34.87	65
岡山	OKYH03	133.79	34.78	69
美星	OKYH06	133.53	34.68	69
吉舎	HRSH09	132.95	34.7	75
勝央	OKYH11	134.12	35.07	75
邑智	SMNH04	132.53	35.09	78
真備	OKYH04	133.69	34.64	78
羽須美	SMNH05	132.64	34.87	80
智頭	TTRH01	134.22	35.26	80
神辺	HRSH05	133.42	34.56	81
御調	HRSH03	133.14	34.52	87
瀬戸	OKYH02	134.07	34.75	89
大和	HRSH02	132.95	34.55	90
大原	OKYH12	134.32	35.1	91
石見	SMNH08	132.42	34.88	96
上郡	HYGH05	134.33	34.9	99
玉野	OKYH01	133.89	34.51	99
江津	SMNH13	132.31	35.01	100
沼隈	HRSH04	133.35	34.38	100
南光	HYGH02	134.42	35.07	101
日生	OKYH13	134.27	34.73	104
三原	HRSH01	133.02	34.37	106

Table.C.2: sites considered for *E.A.* calculations in 2004 Niigataken chuetsu earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
長岡	NIGH01	138.89	37.43	20
川西	NIGH11	138.74	37.17	22
六日	NIGH15	139	37.05	32
加茂	NIGH06	139.07	37.65	46
湯沢	NIGH19	138.78	36.81	55
村松	NIGH07	139.26	37.67	56
野沢温泉	NGNH29	138.44	36.91	58
妙高	NIGH18	138.26	36.94	68
妙高高原	NIGH17	138.1	36.86	84
聖籠	NIGH05	139.28	37.98	86
会津高田	FKSH04	139.81	37.45	86
高郷	FKSH03	139.75	37.61	87
下郷	FKSH05	139.87	37.25	90
嬭恋	GNHM08	138.52	36.49	95
戸隠	NGNH28	138.1	36.71	95
矢板	TCGH09	139.84	36.86	99
糸魚川	NIGH16	137.85	36.94	99
今市	TCGH11	139.77	36.71	104
荒川	NIGH03	139.43	38.13	106
関川	NIGH04	139.54	38.13	111
朝日	NIGH02	139.55	38.28	126

Table.C.3: sites considered for *E.A.* calculations in 2005 Fukuokaken seihouoki earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
富士	SAGH03	130.23	33.41	38
鎮西	SAGH01	129.89	33.51	38
宇美	FKOH03	130.55	33.56	41
東脊振	SAGH04	130.4	33.37	47
嘉穂	FKOH04	130.75	33.55	58
小石原	FKOH08	130.83	33.47	68
？川	FKOH05	130.95	33.53	76
佐世保南	NGSH03	129.81	33.13	76
北九州	FKOH01	130.98	33.88	76
豊浦	YMGH08	130.93	34.13	82
鹿北	KMMH01	130.69	33.11	85
平戸	NGSH01	129.44	33.21	91
玉名	KMMH17	130.56	32.99	91
高来	NGSH05	130.14	32.91	93
琴海	NGSH04	129.8	32.96	94
美弥	YMGH02	131.14	34.11	98
菊池	KMMH03	130.83	33	102

Table.C.4: sites considered for *E.A.* calculations in 2007 Notohanto oki earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
柳田	ISKH02	137.04	37.36	37
珠洲	ISKH01	137.28	37.53	64
井波	TYMH05	136.96	36.57	77
金沢	ISKH07	136.64	36.52	79
八尾	TYMH06	137.16	36.57	84
魚津	TYMH04	137.47	36.79	85
利賀	TYMH07	137.04	36.44	93
尾口	ISKH09	136.72	36.27	107
白川	GIFH13	136.9	36.27	108
糸魚川	NIGH16	137.85	36.94	109
神岡	GIFH10	137.37	36.38	113
古川	GIFH04	137.2	36.24	119
白馬	NGNH36	137.85	36.7	120

Table.C.5: sites considered for *E.A.* calculations in 2007 Niigataken chuetsuoki earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
長岡	NIGH01	138.89	37.43	33
加茂	NIGH06	139.07	37.65	45
川西	NIGH11	138.74	37.17	48
湯の谷	NIGH12	138.98	37.22	53
村松	NIGH07	139.26	37.67	61
塩沢	NIGH14	138.85	37.03	65
六日	NIGH15	139	37.05	68
只見	FKSH21	139.31	37.34	69
野沢温泉	NGNH29	138.44	36.91	76
妙高	NIGH18	138.26	36.94	77
聖籠	NIGH05	139.28	37.98	77
湯沢	NIGH19	138.78	36.81	86
水上	GNMH13	139.06	36.86	89
妙高高原	NIGH17	138.1	36.86	92
伊南	FKSH06	139.52	37.17	93
檜枝岐	FKSH07	139.38	37.01	93
荒川	NIGH03	139.43	38.13	97
糸魚川	NIGH16	137.85	36.94	98
西会津	FKSH01	139.72	37.76	102
関川	NIGH04	139.54	38.13	105
戸隠	NGNH28	138.1	36.71	106
会津高田	FKSH04	139.81	37.45	108
高山	GNMH09	138.91	36.62	109
利根	GNMH07	139.21	36.7	111
朝日	NIGH02	139.55	38.28	116
藤原 2	TCGH17	139.69	36.99	116

Table.C.6: sites considered for *E.A.* calculations in 2008 Iwate-Miyagi nairiku earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
一関西	IWTH25	140.86	39.01	8
一関東	IWTH26	141	38.97	15
東成瀬	AKTH04	140.71	39.17	23
金ヶ崎	IWTH24	141.01	39.2	23
鳴子	MYGH02	140.65	38.86	29
花巻南	IWTH20	141.05	39.34	38
湯沢	AKTH19	140.47	39.19	40
藤沢	IWTH05	141.35	38.87	45
東和	MYGH04	141.33	38.79	48
住田	IWTH04	141.39	39.18	48
花巻北	IWTH19	141	39.46	50
鳥海	AKTH05	140.32	39.07	49
東和	IWTH22	141.3	39.33	50
田尻	MYGH06	141.07	38.59	52
大森	AKTH18	140.39	39.35	56
陸前高田	IWTH27	141.53	39.03	57
中仙	AKTH17	140.61	39.56	64
志津川	MYGH12	141.44	38.64	66
唐桑	MYGH03	141.64	38.92	67
矢巾	IWTH15	141.09	39.61	67
戸沢	YMTH09	140.18	38.75	69
矢島	AKTH03	140.13	39.22	69
雫石	IWTH16	140.95	39.64	68
河北	MYGH11	141.34	38.52	70
西仙北	AKTH16	140.35	39.55	74
八幡	YMTH08	140.03	38.97	74
西木南	AKTH02	140.57	39.66	75
協和	AKTH15	140.41	39.69	84
川井南	IWTH18	141.68	39.46	84
釜石	IWTH23	141.82	39.27	86
仙台	MYGH01	141	38.24	89
西木北	AKTH01	140.58	39.81	91
川井北	IWTH17	141.6	39.64	92
西川東	YMTH15	140.12	38.43	94
玉山	IWTH02	141.38	39.83	99

Table.C.7: sites considered for *E.A.* calculations in 2003 Tokachi oki earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
様似	HDKH07	142.92	42.13	111
大樹	TKCH08	143.15	42.49	117
豊頃	TKCH07	143.52	42.81	130
白糠南	KSRH09	143.98	42.99	141
阿寒南	KSRH02	144.12	43.11	154
芽室	TKCH06	143.06	42.89	155
鶴井南	KSRH07	144.33	43.14	158
本別	TKCH05	143.62	43.12	159
静内	HDKH06	142.36	42.35	161
新冠	HDKH05	142.54	42.6	161
清水	TKCH11	142.88	42.87	161
鶴居東	KSRH06	144.43	43.22	168
鶴居西	KSRH05	144.23	43.26	170
標茶南	KSRH04	144.68	43.21	172
足寄西	TKCH03	143.43	43.27	179
足寄東	TKCH02	143.9	43.38	183
浜中	KSRH10	145.12	43.21	186
新得南	TKCH04	142.92	43.17	186
占冠	KKWH08	142.66	43.04	187
平取西	HDKH01	142.23	42.7	188
標茶北	KSRH03	144.63	43.38	188
阿寒北	KSRH01	144.08	43.44	189
門別西	HDKH04	142.04	42.51	191
別海西	NMRH05	144.8	43.39	193
陸別	TKCH01	143.68	43.47	195
新得北	TKCH10	142.94	43.33	200
別海東	NMRH04	145.12	43.4	204
穂別	IBUH02	142.13	42.87	205
厚真	IBUH03	141.86	42.65	211

Table.C.8: sites considered for *E.A.* calculations in 2005 Miyagiken oki earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
河北	MYGH11	141.34	38.52	101
志津川	MYGH12	141.44	38.64	101
唐桑	MYGH03	141.64	38.92	110
東和	MYGH04	141.33	38.79	117
仙台	MYGH01	141	38.24	120
藤沢	IWTH05	141.35	38.87	121
田尻	MYGH06	141.07	38.59	124
陸前高田	IWTH27	141.53	39.03	125
山元	MYGH10	140.89	37.94	131
岩沼	MYGH08	140.84	38.11	133
釜石	IWTH23	141.82	39.27	137
浪江	FKSH20	140.99	37.49	142
住田	IWTH04	141.39	39.18	144
小野田	MYGH05	140.78	38.58	146
一関東	IWTH26	141	38.97	150
白石	MYGH09	140.6	38.01	154
川井南	IWTH18	141.68	39.46	160
一関西	IWTH25	140.86	39.01	162
都路	FKSH19	140.72	37.47	162
東和	IWTH22	141.3	39.33	162
川俣	FKSH17	140.6	37.66	163

Table.C.9: sites considered for *E.A.* calculations in 2011 Sanriku oki earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
唐桑	MYGH03	141.64	38.92	157
志津川	MYGH12	141.44	38.64	164
釜石	IWTH23	141.82	39.27	164
河北	MYGH11	141.34	38.52	170
陸前高田	IWTH27	141.53	39.03	171
山田	IWTH21	141.93	39.47	173
東和	MYGH04	141.33	38.79	178
藤沢	IWTH05	141.35	38.87	178
川井南	IWTH18	141.68	39.46	187
住田	IWTH04	141.39	39.18	189
田尻	MYGH06	141.07	38.59	195
田老	IWTH14	141.91	39.74	197
仙台	MYGH01	141	38.24	200
東和	IWTH22	141.3	39.33	205
川井北	IWTH17	141.6	39.64	206
一関東	IWTH26	141	38.97	211
山元	MYGH10	140.89	37.94	213
岩沼	MYGH08	140.84	38.11	214
岩泉	IWTH03	141.65	39.8	216
金ヶ崎	IWTH24	141.01	39.2	219
小野田	MYGH05	140.78	38.58	220

Table.C.10: sites considered for *E.A.* calculations in 2001 Geiyo earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
三原	HRSH01	133.02	34.37	65
砥部	EHHM05	132.8	33.71	69
大和	HRSH02	132.95	34.55	73
西条	EHHM02	133.18	33.87	72
岩国	YMGH03	132.13	34.19	74
広島	HRSH12	132.43	34.58	77
佐伯	HRSH08	132.16	34.39	78
御調	HRSH03	133.14	34.52	78
周東	YMGH04	132.06	34.03	79
沼隈	HRSH04	133.35	34.38	83
池川	KOCH05	133.14	33.65	83
美川	YMGH05	131.99	34.2	84
吉舎	HRSH09	132.95	34.7	85
河辺	EHHM07	132.75	33.5	86
柳谷	EHHM08	133	33.54	86
芸北	HRSH10	132.38	34.75	92
吾北	KOCH02	133.36	33.71	91
匹見	SMNH09	132.01	34.57	96
伊方	EHHM09	132.31	33.47	96
神辺	HRSH05	133.42	34.56	96
羽須美	SMNH05	132.64	34.87	98
日吉	EHHM06	132.8	33.33	102
石見	SMNH08	132.42	34.88	102
美都	SMNH07	132.04	34.69	102
神石	HRSH11	133.17	34.82	102
口和	HRSH06	132.91	34.91	103
新宮	EHHM03	133.65	33.92	103
三野	KGWH02	133.71	34.2	106
徳地	YMGH11	131.69	34.21	107
金城	SMNH06	132.2	34.88	109
須崎	KOCH07	133.29	33.39	110
美星	OKYH06	133.53	34.68	110
大正	KOCH03	132.99	33.27	110
江津	SMNH13	132.31	35.01	117
防府	YMGH01	131.56	34.05	118

Table.C.11: sites considered for *E.A.* calculations in 2001 Iwateken nairikunanbu earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
東和	IWTH22	141.3	39.33	122
花巻南	IWTH20	141.05	39.34	124
花巻北	IWTH19	141	39.46	124
住田	IWTH04	141.39	39.18	125
矢巾	IWTH15	141.09	39.61	125
金ヶ崎	IWTH24	141.01	39.2	126
川井南	IWTH18	141.68	39.46	127
川井北	IWTH17	141.6	39.64	128
玉山	IWTH02	141.38	39.83	131
釜石	IWTH23	141.82	39.27	132
一関東	IWTH26	141	38.97	133
東成瀬	AKTH04	140.71	39.17	133
一関西	IWTH25	140.86	39.01	134
岩泉	IWTH03	141.65	39.8	134
山田	IWTH21	141.93	39.47	135
中仙	AKTH17	140.61	39.56	135
藤沢	IWTH05	141.35	38.87	136
唐桑	MYGH03	141.64	38.92	137
葛巻	IWTH13	141.55	39.94	138
西木南	AKTH02	140.57	39.66	139
田老	IWTH14	141.91	39.74	139
東和	MYGH04	141.33	38.79	140
湯沢	AKTH19	140.47	39.19	142
大森	AKTH18	140.39	39.35	143
西木北	AKTH01	140.58	39.81	143
一戸	IWTH11	141.19	40.08	144
協和	AKTH15	140.41	39.69	146
西仙北	AKTH16	140.35	39.55	146
鹿角	AKTH14	140.81	40.06	147
志津川	MYGH12	141.44	38.64	149
久慈南	IWTH09	141.71	40.09	149
鳥海	AKTH05	140.32	39.07	151
田尻	MYGH06	141.07	38.59	152
二戸東	IWTH01	141.34	40.24	154
二戸西	IWTH06	141.17	40.26	155
河北	MYGH11	141.34	38.52	156

阿仁	AKTH13	140.41	39.98	156
矢島	AKTH03	140.13	39.22	157
小野田	MYGH05	140.78	38.58	158
軽米	IWTH07	141.57	40.27	158
田子	AOMH18	141.01	40.3	159

Table.C.12: sites considered for *E.A.* calculations in 2003 Miyagiken oki earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
唐桑	MYGH03	141.64	38.92	72
志津川	MYGH12	141.44	38.64	76
陸前高田	IWTH27	141.53	39.03	76
藤沢	IWTH05	141.35	38.87	77
東和	MYGH04	141.33	38.79	77
河北	MYGH11	141.34	38.52	83
住田	IWTH04	141.39	39.18	86
釜石	IWTH23	141.82	39.27	88
田尻	MYGH06	141.07	38.59	92
一関東	IWTH26	141	38.97	94
東和	IWTH22	141.3	39.33	97
金ヶ崎	IWTH24	141.01	39.2	101
川井南	IWTH18	141.68	39.46	101
一関西	IWTH25	140.86	39.01	103
山田	IWTH21	141.93	39.47	104
花巻南	IWTH20	141.05	39.34	107
小野田	MYGH05	140.78	38.58	109
仙台	MYGH01	141	38.24	112
花巻北	IWTH19	141	39.46	117
川井北	IWTH17	141.6	39.64	117
矢巾	IWTH15	141.09	39.61	125
田老	IWTH14	141.91	39.74	127
岩沼	MYGH08	140.84	38.11	128
岩泉	IWTH03	141.65	39.8	131

Table.C.13: sites considered for *E.A.* calculations in 2009 Surugawan earthquake

Site	code	longitude	latitude	D (km)
清水南	SZOH43	138.49	34.97	31
西伊豆西	SZOH39	138.77	34.8	34
静岡南	SZOH33	138.35	35.01	37
藤枝	SZOH36	138.2	34.91	39
南伊豆	SZOH41	138.83	34.67	40
清水北	SZOH34	138.42	35.13	46
川根	SZOH31	138.08	34.94	48
河津	SZOH40	138.97	34.78	49
修善寺	SZOH42	138.91	34.98	49
芝川	SZOH37	138.57	35.2	52
袋井	SZOH26	137.9	34.79	60
函南	SZOH38	138.98	35.09	60
伊東中	SZOH35	139.09	34.95	62
身延	YMNH13	138.42	35.35	68
静岡北	SZOH29	138.2	35.31	69
龍山東	SZOH32	137.84	35.01	69
浜松	SZOH28	137.74	34.67	74
水窪北	SZOH30	137.92	35.22	76
早川	YMNH09	138.33	35.43	77
引佐	SZOH24	137.66	34.83	80
南信濃	NGNH25	137.93	35.3	81
豊根	AICH17	137.73	35.18	86
鳳来	AICH10	137.62	35	87
上九一色	YMNH15	138.6	35.53	87
早川北	YMNH10	138.31	35.54	89
山北中	KNGH19	139.04	35.42	89
飯田	NGNH54	138.01	35.45	90
松田	KNGH20	139.13	35.37	90
増穂	YMNH12	138.45	35.56	90
新居	SZOH25	137.56	34.69	90
都留南	YMNH14	138.97	35.51	94
新城	AICH20	137.49	34.9	96
豊橋北	AICH22	137.44	34.79	100
設楽	AICH16	137.53	35.15	100
平谷	NGNH14	137.63	35.31	101
喬木	NGNH13	137.88	35.51	101

清川	KNGH21	139.21	35.46	102
作手	AICH19	137.41	34.95	104
豊橋	AICH09	137.39	34.66	105
西野原	YMNH08	138.73	35.69	106
大月	YMNH11	138.98	35.62	105

謝辞

本論文を執筆するにあたって著者は多くの協力・援助を得た。

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻の神田順 教授からは、指導教員として学部生の時から継続して計4年近くに渡り有益なアドバイスを頂いた。また同専攻所属の佐久間哲哉 准教授から副指導教員として、論文の分かりやすさやストーリーの展開の仕方など大変重要なお指摘を頂いた。東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻の高田毅士 教授と糸井達哉 特任助教からは幾度かの発表においてコメントや質問を頂いた。大崎総合研究所の壇一男 博士からは位相差分の歪度と尖度という、そもそもの主題の選定において欠かせない助言を頂いた。清水建設の石井透 博士の修士論文は著者の論文の質を高める上で重要な役割を果たしたと考えられる。

著者はこういった教員・先輩研究者だけでなく、学生からも様々な協力を得た。神田研で同時期に所属した羅元隆、青山大樹、市原義孝、谷口裕子、寺井亮、帯刀良之、和田貴行各位とは研究に関係ある話から他愛のない話題に及ぶまで、多くのコミュニケーションを取った。彼らのおかげで楽しい学生生活を過ごせたと言っても過言ではない。神田研のOBや社会文化環境学専攻の他の研究室の学生、高田研究室の学生各位を含む本郷の友人にも同様の理由で感謝に堪えない。

また家族のサポートも必要不可欠であった。授業料はもちろんのこと、食事代や一年の留学費用など不出来な息子のために多くの援助を頂いた。この場を借りて感謝したい。

総括すれば、どのような種類の仕事であれ、一定の成果をあげるためには基礎的な理解力や学力、体力、精神力、意志疎通力が欠かせないということ、そして人と人とのつながりが、個人の持って生まれた才能からは想像もつかないような成果を挙げる手助けとなることを痛感した学生生活であった。