

3.6 三次元地震動データベースの整備

既存地震動を対象としたデータベースの構築を行うとともに、三次元強震動波形推定に関する研究を併せて行い、E-ディフェンスを利用する実験研究に使用する入力地震動の提供を目的として、三次元地震動データベースを整備する。

既存の地震動としては、国内外の記録を対象としてその属性に関する資料を収集、整理しデータベースシステムを構築する。その中から、E-ディフェンスの加震特性に配慮し、これを利用する実験研究用の入力地震動データベースに仕上げる。また、具体的に大都市圏地域の代表的なサイトを対象に将来予測される大地震の三次元強震動波形推定を行い、データベースの中に取り込み、その過程で、三次元強震動波形推定のための手法整備も実施する。最終的には、データベース構築と三次元強震動波形推定で得られるこれらの知見に基づき三次元地震動作成・選定機能を持つデータベースとして仕上げる。

検討項目としては、

- (1) 統計的手法による大地震強震波形の予測及び三次元データベース化に関する研究
- (2) 三次元地震動データベースの構築に関する研究
- (3) 三次元強震動波形推定に関する研究

とし、(2)及び(3)の成果を踏まえ、(1)でE-ディフェンスを利用する実験研究に使用する三次元地震動データベースとしてまとめる。

3.6.1 統計的手法による大地震強震動波形の予測及び三次元地震動データベース化に関する研究

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成15年度業務目的

(2) 平成15年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
 - 1) 模擬地震動作成の現状の評価及び改善事項の調査
 - 2) 振幅と位相の成分間差異評価に基づく地震動推定のための統計的手法の構築
 - 3) E-ディフェンスでのデータベースインターフェイスシステムの骨子の構築
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

(3) 平成16年度業務計画案

- (a) 業務計画
- (b) 実施方法
- (c) 目標とする成果

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

統計的手法による大地震強震動波形の予測及び三次元地震動データベース化に関する研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人防災科学技術研究所	特別研究員	阿部健一	ken-abe@bosai.go.jp

(c) 業務の目的

国内外の既存の地震動記録を対象としてその属性に関する資料を収集、整理し、三次元地震動データベースシステムを構築する。さらに、具体的に大都市圏地域の代表的なサイトを対象に将来予測される大地震の三次元強震動波形推定を行い、データベースの中に取り込み、その過程で、統計的手法も含め三次元強震動波形推定のための手法整備も実施する。これらを踏まえ、三次元地震動作成・選定機能を整備し、併せてE-ディフェンスの加振特性に配慮し、これを利用する実験研究用の入力地震動データベースに仕上げる。

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

三次元地震動データベース化の全体計画策定を行い、データベースシステムの全体骨子を作成し、内外の既存地震動の収集と属性調査のうえシステム構築を行い、想定大地震動の予測波形も含み、併せて地震動波形予測機能を持つシステムを目指すこととした。予測機能の中には、統計的予測手法も含み、これに関する文献調査を実施した。統計的波形合成法の手法については、各成分間の振幅スペクトルの関係、および振幅スペクトルと位相スペクトルを関係づけるWiener-Lee変換に関する検討を行った。一例として2000年鳥取県西部地震の10月8日余震記録（水平2成分：美保観測点）を用い、その振幅スペクトルから位相スペクトルをWiener-Lee変換により求め、観測記録の再現性に関する検討を行ない、フーリエ振幅スペクトルの情報のみから原波形が十分に再現出来ないことが分かった。これらのことから、本研究では3次元的な振幅スペクトル間関係とともに位相スペクトルの特性把握が重要な課題であることが分かった。

2) 平成15年度：

統計的手法による大地震強震動波形の予測では、位相特性を考慮した波形合成法構築のため、サイトの位相特性に基づく波形推定法の検討を行い、併せてそのための地震動収集を実施する。また、E-ディフェンスのためのインターフェイスシステム構築のため、加振性能限界の観点からの基準整備のための要件抽出を行う。

3) 平成16年度：

収集地震動記録に基づく統計解析として、位相評価を考慮した強震動波形予測法として仕上げるために、振幅および位相の成分間差異検討を統計的手法によりおこなう。さらに、E-ディ

フェンス用データベースのインターフェイスシステムの骨子構築のため、実験ユーザーサイドからの整理要件と、加振限界性能面から整理された要件にたいする基準整備を進める。

4) 平成17年度：

三次元地震動の統計解析に基づき、位相特性を考慮した統計的手法によるプロトタイプ地震動波形を求める。また、E-ディフェンス用データベースのインターフェイスシステムの骨子に基づき、プロトタイプのデータベースシステムをE-ディフェンスサイトへ導入する。

5) 平成18年度：

プロトタイプのデータベースシステムへ三次元地震動作成機能を追加し、併せて地震動選定機能を充実させ、総合的なデータベースシステムとする。

(e) 平成15年度業務目的

統計的手法による大地震強震動波形の予測では、位相特性を考慮した波形合成法構築のため、サイトの位相特性に基づく波形推定法を取り上げ、Meyer and Yamadaのウェーブレット変換逆変換の解析ツールを開発し、サンプルサイトデータ用の地震動収集を実施する。また、E-ディフェンスのためのインターフェイスシステム構築のため、加振性能限界の観点からの基準整備のための要件抽出を行う。

(2) 平成15年度の成果

(a) 業務の要約

統計的手法による大地震強震動波形の予測では、位相特性の扱いを工夫し、これを取り込んだ地震動推定法の構築を行う。併せて、3.6.2の三次元地震動データベースの構築に関する研究及び3.6.3の三次元強震動波形推定に関する研究の成果を取り込んで、E-ディフェンス用に特化した地震動推定・選定機能をもつデータベースとするためのインターフェイスシステムの骨子の構築にも取り組む。位相特性を取り込んだ地震動波形推定法の構築のために、現状の模擬地震動作成法の評価を実施した。その結果、Bilgolen and Irikuraが提案するウェーブレット変換を利用したサイトの位相特性に基づく波形推定法を取り上げ、波形推定法のためにMeyer and Yamadaのウェーブレット変換逆変換の解析ツールを開発するとともに、サンプルサイトデータ群として将来的にK-NET、KiK-netの補完となりうる電力中央研究所強震観測網及びKASSEMの強震観測データの収集を実施した。また、インターフェイスシステム構築のため、加振性能限界の観点からの基準整備のための要件を抽出した。

(b) 業務の成果

1) 模擬地震動作成の現状の評価及び改善事項の調査

3次元地震動の合成という観点から模擬地震動作成法をみると、位相情報の評価が重要な要素となる。これまでの模擬地震動作成法において位相がどのように扱われているか整理した。

)多くの構造物の入力地震動の波形合成方法

所謂大崎スペクトルに代表されるように地震動の振幅値は、地震マグニチュードや震源距離をパラメータとする目標スペクトルから定められる。経時特性についても、同様なパラメータから

定められるが、位相特性については、乱數位相や実地震動位相などを用いて波形合成を行っているのが、現状である。目標スペクトルの定め方は、地震基盤や工学的基盤を基準とするなど、各機関においてそれぞれ異なる。動的解析を行う大部分の構造物や原子力施設の審査用の入力地震動の波形合成は、この方法により行われている。

) 日本建築センター評定に用いられる入力地震動の波形合成方法

日本建築センター評定において一般的に用いられている模擬地震動波形合成については、吉村¹⁾(2003)により図 1 のように整理されている。また、原子力施設のチェック用としてもこれらの方法が適用されている。ここで示されている距離減衰式や断層面を考慮した距離減衰式による方法は、)に述べている波形合成法と同等であり、別途位相・包絡形は付与される。経験的グリーン関数法及びそのハイブリッド法では、要素地震動や断層すべり過程などに対応して位相が合成過程で考慮されるが、対象地点において適切な要素地震動が選定できないこともある。その代替として統計的グリーン関数法とそのハイブリッド法があるが、位相を統計的に与えるには至っていない。

) 鉄道構造物へ用いられる入力地震動の波形合成方法

佐藤他²⁾(2000)が提案し、(財)鉄道総合技術研究所にて取り入れられている手法であり、目標スペクトルに対するフィッティングにより波形合成を行うに際し、位相特性を以下の概念を用いて整理している。

フーリエ位相スペクトル $\phi(\omega)$ を で微分した群遅延時間 $T_{gr}(\omega)$ は、

$$T_{gr}(\omega) = \frac{d\phi(\omega)}{d\omega}, \quad (1)$$

で表される。この $T_{gr}(\omega)$ を、地震マグニチュードと震央距離を説明変数とする回帰モデルから定め、積分することにより位相 $\phi(\omega)$ を求め、スペクトルフィッティングにより波形合成を行っている。各観測波から $T_{gr}(\omega)$ を求めるにときウェーブレット解析を用いている。ただし、回帰モデルにおいて地盤種別がなされているわけではない。

) Birgoren and Irikura によるサイト位相特性を考慮した統計的グリーン関数による波形合成法³⁾

本手法の特徴は、ウェーブレット変換により観測波のウェーブレット係数から震源及び伝播特性の影響を除去して、サイト特性によるウェーブレット係数を求めている点にあり、それを逆変換してサイト特性による波形を得ることが出来る。

本手法においては、Meyer-Yamada のウェーブレットを用いており、ある周期帯のウェーブレット係数の振幅の絶対値の 2 乗和がその周期帯のパワースペクトル値に整合していることを前提とし、そのことを検証の上取り入れている。さらに小地震においては震源及び伝播特性による

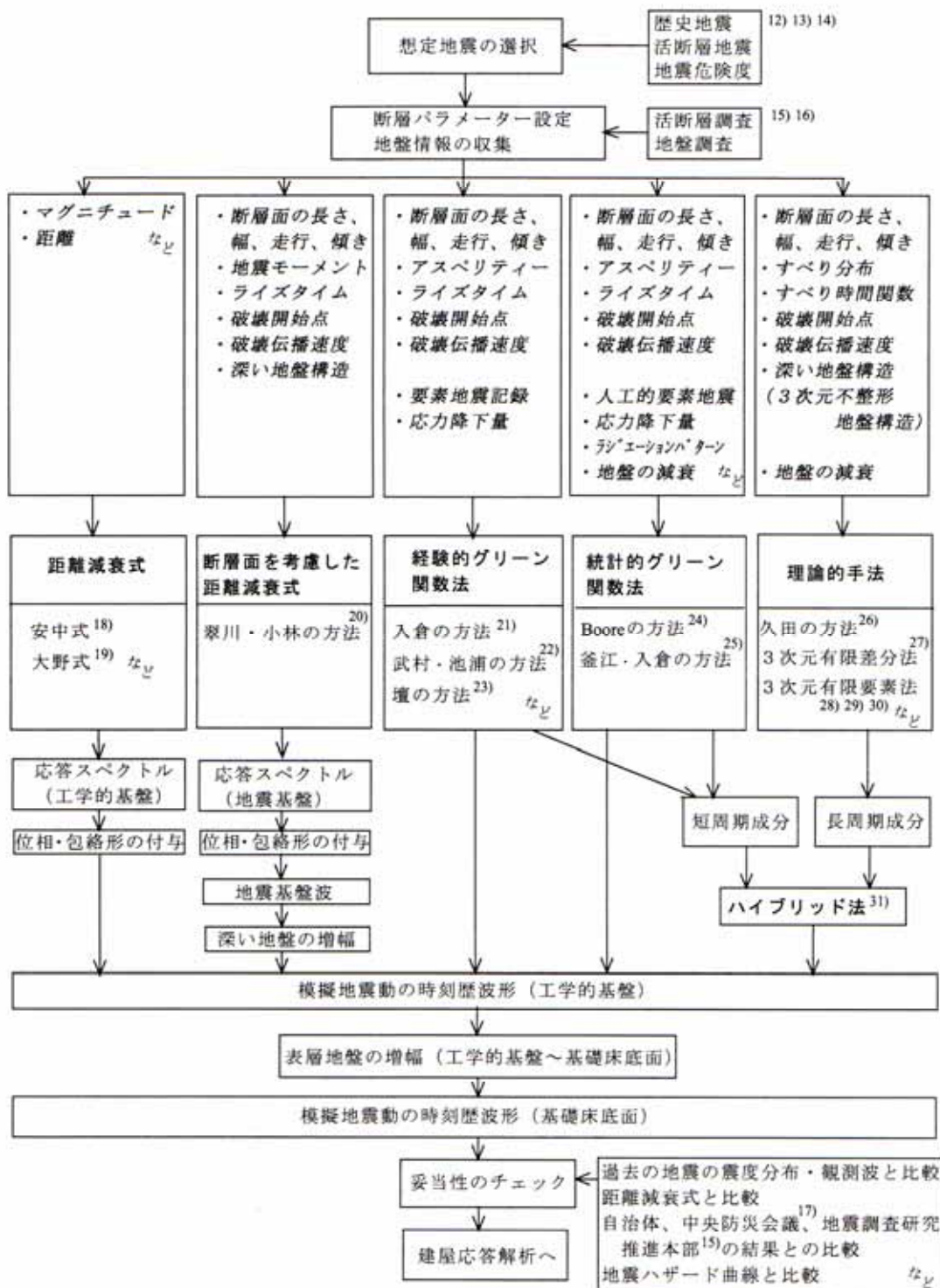


図1 日本建築センター評定で一般的に用いられる波形合成法¹⁾(吉村、実務から見た設計用地震動評価の現状と問題点、pp81-pp90、第31回地盤振動シンポジウム、日本建築学会、2003より抜粋：このフロー図に示す片括弧の上付き数値は、本図の引用元の参考文献番号であり、本報告書の参考文献番号とは異なる)

群遅延時間が無視できると仮定することにより、下式によりサイト特性に起因するウェーブレット係数を導いている。

$$\alpha_{j,k,i}^g = \frac{\alpha_{j,k,i}^o}{S(\omega)_{j,i} P(\omega)_{j,i}} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_{j,k,i}^g$ は、周期帯 j における i 地震のサイト特性によるウェーブレット係数

$\alpha_{j,k,i}^o$ は、周期帯 j における i 地震の観測波によるウェーブレット係数

$S(\omega)_{j,i}$ は、周期帯 j における i 地震の震源スペクトル値

$P(\omega)_{j,i}$ は、周期帯 j における i 地震の伝播特性スペクトル値

位相変動の主要因は、深い基盤構造から地震波が入射することにより起こると考えられるので、本検討においてもこの考え方に基づいて実施する。

2) 振幅と位相の成分間差異評価に基づく地震動推定のための統計的手法の構築

地震動推定のための統計的手法は、1) 模擬地震動作成の現状と評価の項で示した距離減衰式に基づく手法により構築する。地震動推定法としては、簡易であり一般の構造物設計に幅広く用いられ、かつ理学から工学の広い分野にわたるユーザーへの一つのオプションとして整備を進める。

本手法において、地震動の振幅値は目標スペクトルにフィッティングすることが基本であるが、その位相は、個別に付与するため、地震動作成者の技量に依存する部分があることは否めない。

したがって、振幅と位相の成分間差異を進めるに際して、位相の評価の進め方が最大の課題となる。ここでは、Bilgolen and Irikura³⁾が示した時間領域でのサイト特性評価の考え方による離散型ウェーブレット変換解析ツール作成を行う。

また振幅の評価と平行して実施する必要性があることから、サイト特性が予め概ね調査されていることが望ましく、その要件を満たす地震観測網のデータを収集して、これをサンプルサイトデータとして検討を進める。地震動データの収集対象観測網としては、比較的古くからデジタルデータ収録を実施しており、同時並行で進めている 3.6.2 三次元地震動データベースの構築に関する研究において収録されつつある K-NET などを補完するリファレンスデータとなる可能性があるものを対象とした。

本年度作成した解析ツールを用い、次年度以降に収集地震動データをリファレンスデータとして、時間領域のサイト特性を求め、K-NET 及び KiK-net などのデータを加え、位相特性を取り入れた統計的予測手法による地震動推定を行う。

a) 地震動データの収集

今回収集対象としたのは、古くからデジタルデータ収録で地震観測を実施している電力中央研究所強震観測網と KASSEM 観測網である（両観測網データとも当面は、本テーマに限って利用許諾を得ているものである）。

) 電力中央研究所強震観測網⁴⁾

観測は、1976年9月に2観測点設置とともに開始され、順次観測点が増やされ、最終的には54の地表観測点(各地点NS,EW,UDの3成分)による加速度型地震計観測網である。この観測網の特徴は、関東以北に比較的多くの観測点が配置されているが全国的に観測を展開しており、その対象地盤は岩盤での観測が主体である。そのため、その後全国的に観測が展開されたK-NET及びKiK-netのレファレンス観測点としてそれらの観測網の補完が期待できる。

収集記録は、1980～2000年までの期間の、 $M_j > 4.0$ の観測記録を対象とし、延べ948観測点で、総成分数2844である。データは、各観測点とも3成分が1つのブロックとして多列のテキストデータとして収録されており、収集に際しては、各成分とも単一列時系列データへの変換を実施し、合わせて、速度、変位データも計算している。単一列の時系列データへ変換しているため、市販ソフトで容易に波形作図出力が可能となり、全波形のビジュアル化も行った。

図2に観測点と震央位置を示し、表1に観測点の諸元を示す。また、観測データの特性として、震央距離と地震マグニチュードの相関図を図3に示す。海洋型の地震データが多いこともあり、震央距離が大きくなるほど地震マグニチュードが大きくなる傾向にある。

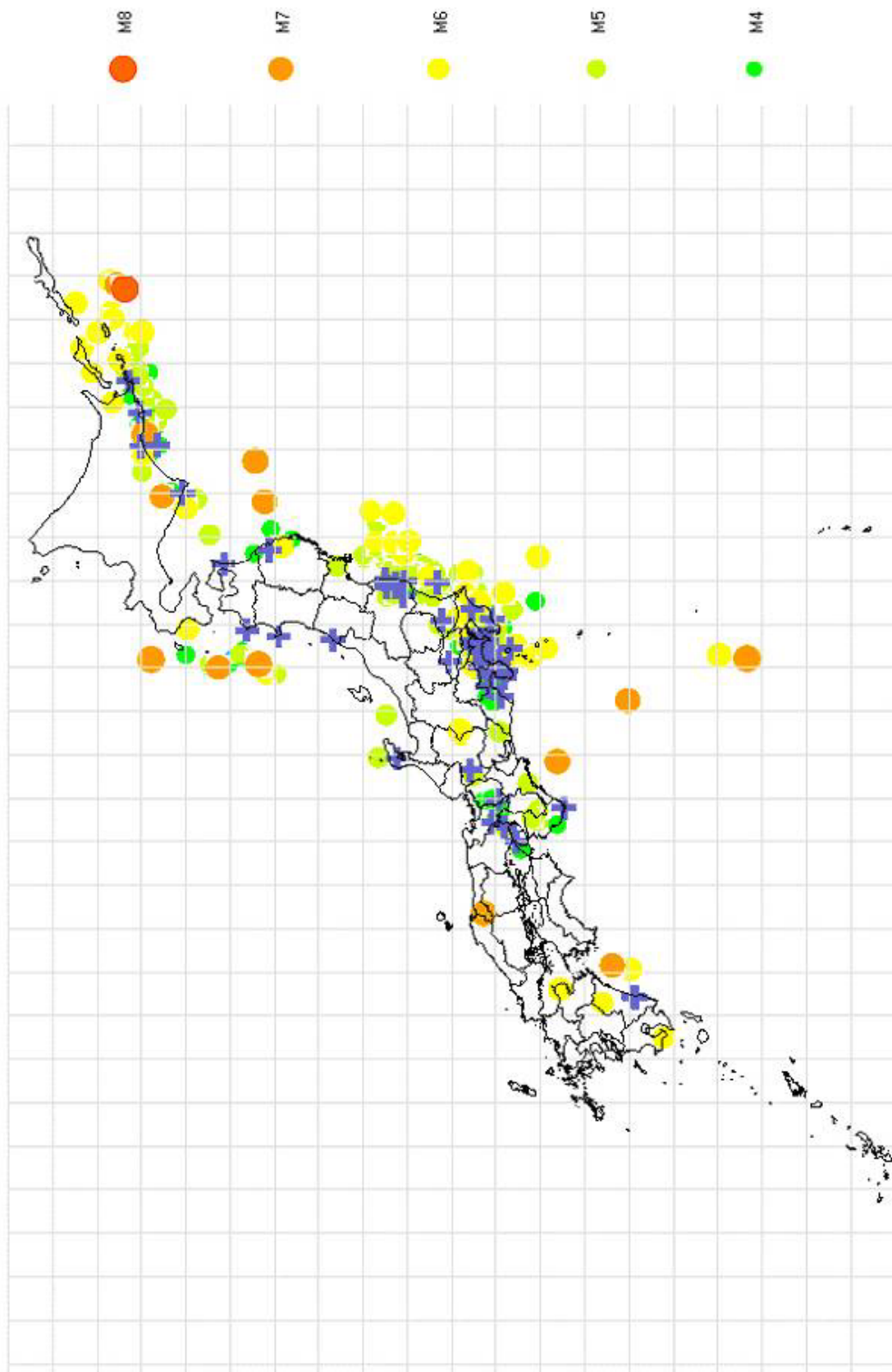


図2 電力中央研究所強震観測点と震央位置

表1 電力中央研究所強震観測点諸元
(表は、次ページに続く)

地点	コード	観測期間	北緯(度)	東経(度)	高度(m)
八千代田	YAS	76/09~	139.0842	34.9442	50
梨本	NST	76/09~	138.9494	34.7756	80
木戸川	KID	77/02~	140.9517	37.2761	85
浪江	NME	77/04~	141.0303	37.4953	10
不老不死	FRF	78/10~02/10	139.865	40.6108	10
真鶴	MNZ	78/12~	139.1553	35.1392	2
初島	HTS	78/12~	139.1719	35.0386	0
韭山	NRV	79/01~	138.9361	35.0636	20
武山	TKY	79/09~	139.6231	35.2222	10
焼津	YIZ	79/09~	138.3386	34.8789	10
那珂湊	NKM	79/12~	140.9522	36.3394	5
瀬戸島	STJ	80/04~	138.5594	35.1975	100
熱海	ATM	80/07~	139.0831	35.0842	25
鴨川	KMG	80/12~	140.1108	35.0906	5
大島	OSM	81/04~	139.4403	34.6858	5
江ノ島	ENS	81/05~92/12	139.4778	35.2958	5
三程	MHD	81/06~02/06	140.8656	37.4722	240
熊倉	KMK	81/06~02/06	140.6597	37.0869	360
宮崎-1	MYZ1	81/12~90/12	131.4367	31.9028	4
宮崎-2	MYZ2	81/12~90/12	131.4272	31.8569	30
鋸山	NKG	82/10~85/05	139.8347	35.1633	45
白糠	SRN	82/12~	141.3844	41.1428	50
大津	OHT	83/11~	135.9692	34.9536	130
東金	TOG	84/02~02/10	140.35	35.5569	15
串本	KMT	84/03~	135.7778	33.4769	10
久慈	KUJ	84/07~	141.7056	40.1133	140
様似	SMN	84/07~	143.0094	42.0828	7
根室	NMR	84/07~	145.5892	43.2836	3
穴水	ANA	84/10~91/05	136.9167	37.2328	20
根尾	NEO	86/01~99/05	136.6461	35.5739	150
性山寺	TKS	86/04~	140.0814	36.2125	50
田子	TAG	87/06~	138.7633	34.7975	2
平	TIR	87/04~	140.975	37.0589	-70
厚岸	AKS	89/11~	144.8628	43.03	5

地点	コード	観測期間	北緯(度)	東経(度)	高度(m)
小山	OYM	90/03 ~	139.0025	35.3592	270
地蔵堂	JZD	90/03 ~	139.0286	35.3092	490
久野	KNO	90/03 ~	139.1508	35.27	20
米神	KKM	90/03 ~	139.1439	35.2086	50
風祭	KZR	90/03 ~	139.1275	35.2464	90
日吉	HYS	91/04 ~	139.6308	35.5481	30
上菅田	KMS	91/04 ~	139.5716	35.4858	70
南瀬谷	MSY	91/11 ~	139.4892	35.4547	60
寒川	SAM	91/04 ~	139.383	35.3656	6
川奈	KWN	93/07 ~	139.14	34.9492	7
奥尻	OXS	93/07 ~	139.14	34.9492	12
瀬棚	STN	93/07 ~ 93/10	139.14	34.9492	7
大磯	OIS	95/01 ~ 95/03	135.01	34.5533	7
神女大	KWU	95/01 ~ 95/04	144.1133	42.655	140
宝塚	TKZ	95/01 ~	135.3358	34.8189	100
カリソ	KRS	96/11 ~	144.0839	42.9931	50
鶴岡	TRK	96/12 ~	139.6389	38.6811	8
皆野	MNN	97/01 ~	139.1355	36.0542	210
園部	SNB	97/02 ~	135.4489	35.0672	180
男鹿	OGA	97/10 ~	139.7266	39.9094	20

(電力中央研究所我孫子研究所 芝 良昭 氏より提供)

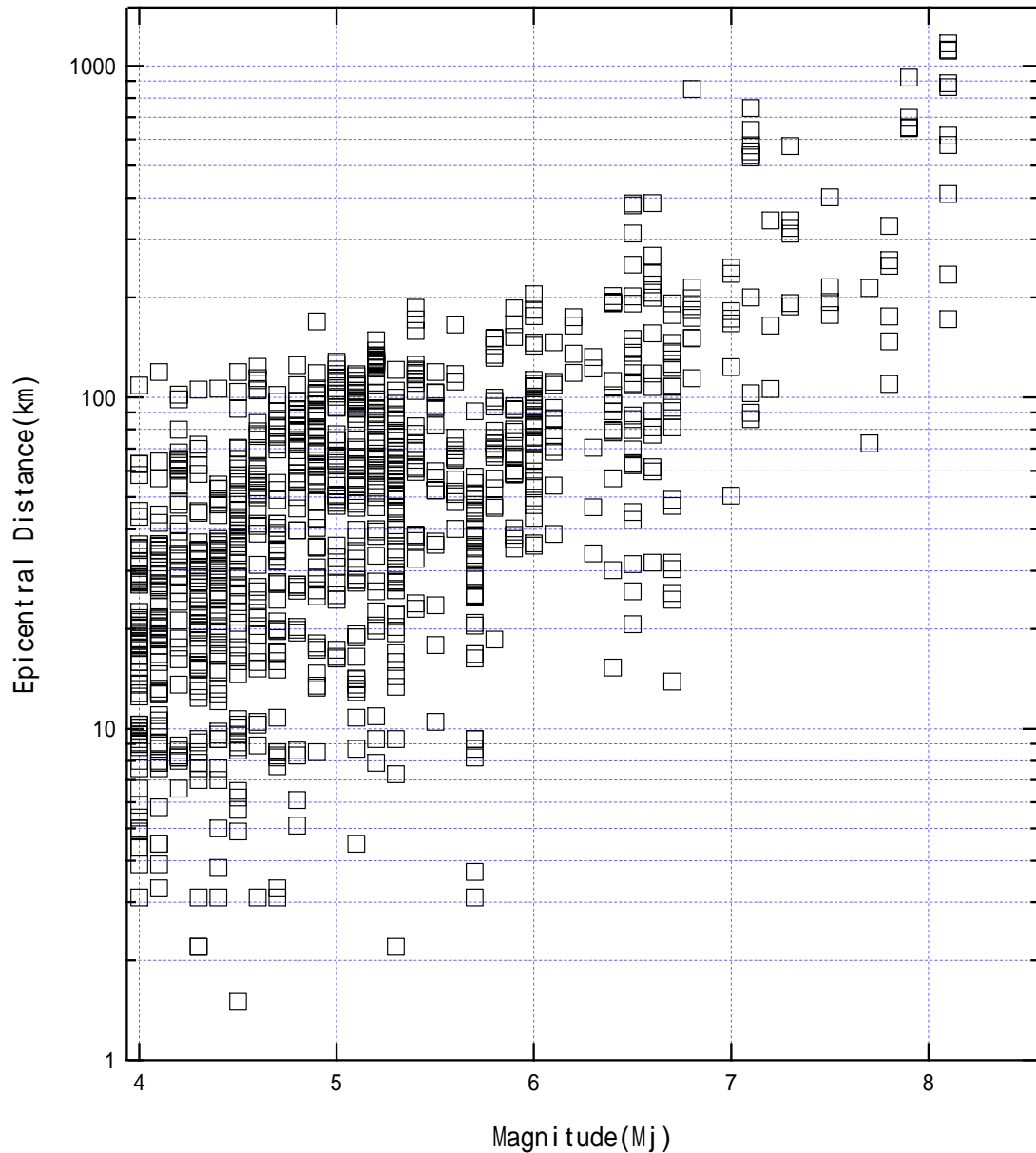


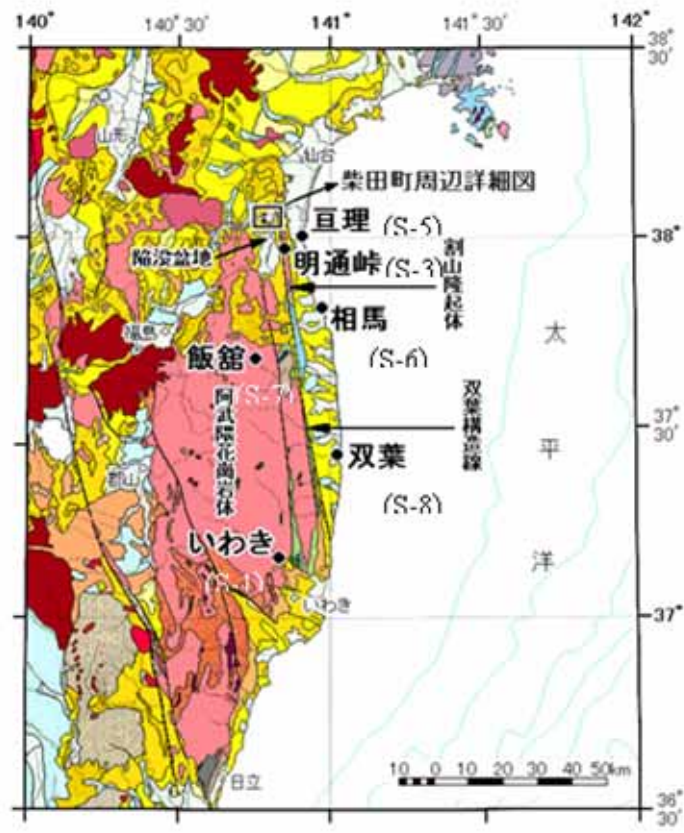
図3 震央距離と地震マグニチュードの相関

) KASSEM 観測網⁵⁾

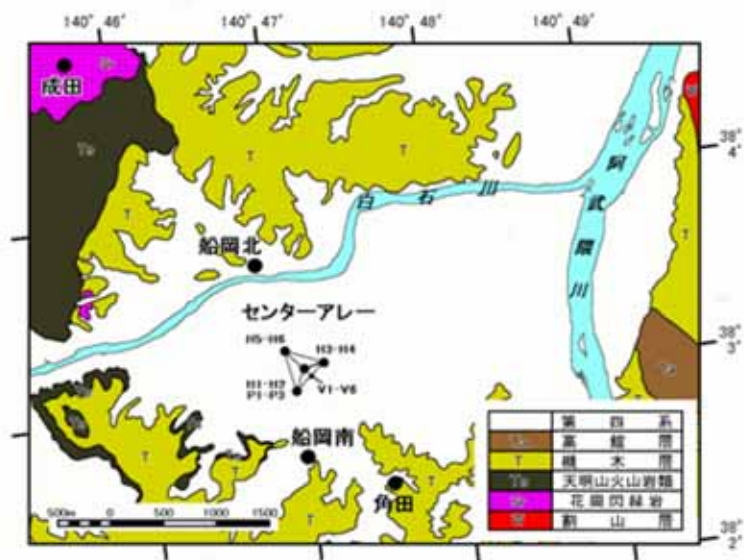
観測は、宮城及び福島県の太平洋沿岸地域を対象として1984年6月より開始され、岩盤露頭を主体の8観測点(3成分加速度計)による強震観測アレーと宮城県柴田町船岡地区における深度400mの地震基盤層まで地中に立体的にダウンホールアレーとして12観測点(埋設型3成分速度計)を配置したセンターアレーから構成されている。また、1992年よりセンターアレーの深部基盤露頭であるS4観測点には、深度25mに埋設型加速度計を追加しダウンホールアレーとしている⁶⁾。

図4に本観測網の観測点配置と地盤状況を示し、観測点諸元は、表2に示す。今回、収集した観測データは、1984.6から1987.4までの地震を対象とし、S4ダウンホールアレーのみ1992.1~1993.11までの観測データを加えた。観測点と震央位置は、図5に示し、震央距離と地震マグ

ニチュードの相関は、図6のようになり、電力中央研究所強震観測網と同様に、両者に相関が認められる。



(a) 全体配置



(b) 柴田町周辺詳細

図4 KAASEM 観測点配置と地盤状況

表 2 KASSEM 観測地点諸元

強震観測アレー		深 度	地 盤	地 形
S1	いわき	GL ±0m	花崗岩	谷
S2	角 田	GL ±0m	軟 岩	丘陵中腹
S3	明通峠	GL ±0m	花崗岩	丘陵の峠
S4	成 田	GL ±0m	花崗岩	丘陵上部
S4D		GL - 25m		
S5	亘 理	GL ±0m	沖積層	海岸低地
S6	相 馬	GL ±0m	軟 岩	海岸台地
S7	飯 館	GL ±0m	花崗岩	山間盆地
S8	双 葉	GL ±0m	軟 岩	海岸台地

センターアレー		深 度	地 盤	地 形
宮城県柴田 町船岡	V-1	GL - 2m	沖積層	盆地中央部平地
	V-2	GL -15m	沖積層	
	V-3	GL -35m	洪積層	
	V-4	GL -57m	軟岩層	
	V-5	GL-155m	軟 岩	
	V-6	GL-401m	花崗岩	
	H-1	GL - 2m	沖積層	
	H-2	GL -58m	軟 岩	
	H-3	GL - 2m	沖積層	
	H-4	GL -57m	軟 岩	
	H-5	GL - 2m	沖積層	
	H-6	GL -55m	軟 岩	

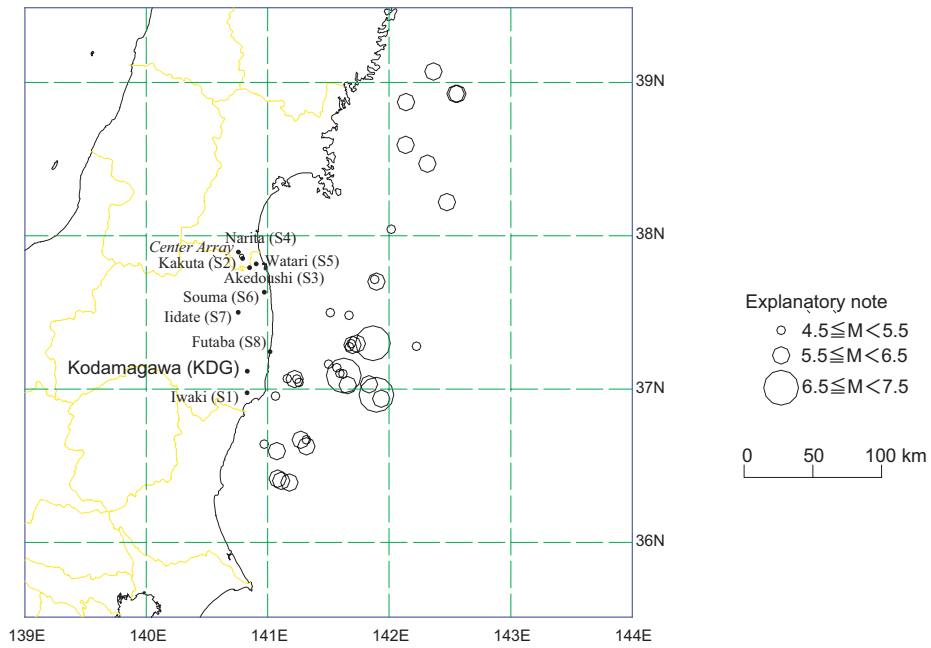


図5 観測点と震央位置

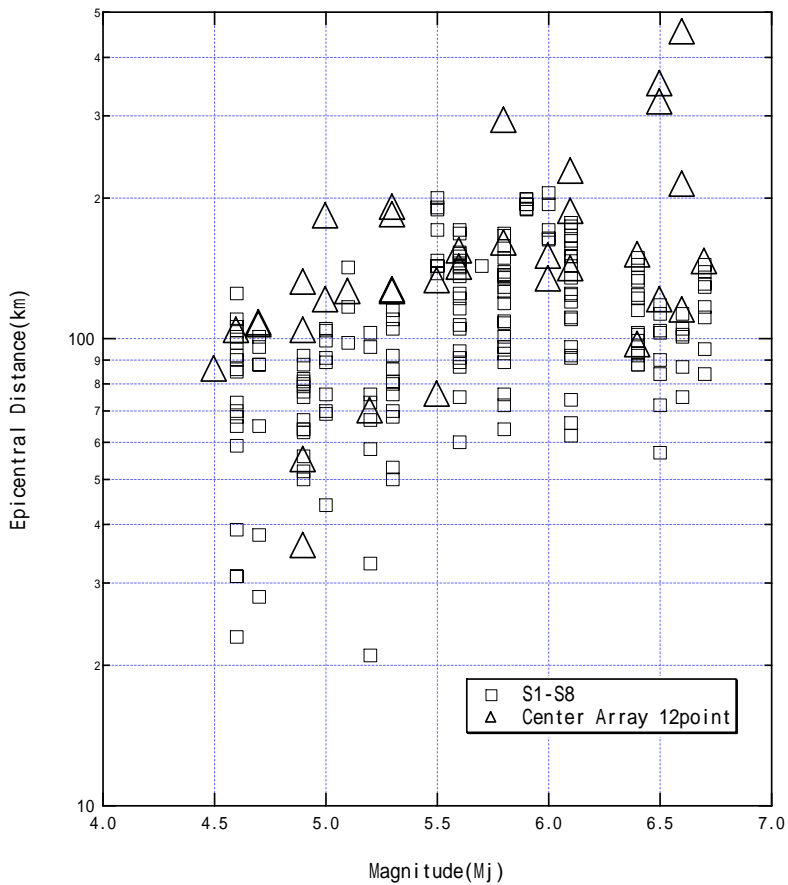


図6 震央距離と地震マグニチュードの相関

収集データは、強震観測アレー42 地震延べ観測点 114 (342 成分) センターアレー36 地震 432 観測点(1296 成分)から得られた。観測データは、各地震毎に1つのブロックとして多列のテキスト

トデータとなっており、収集に際しては、各成分とも単一系列の時系列データへの変換を実施し、加速度記録の場合は、速度と変位データ、速度記録の場合は、加速度と変位データを算出し、全波形データのビジュアル化を可能としている。

この観測網の特徴は、地震基盤に近い岩盤から沖積層地盤までの各種地盤別の観測点による観測を実施しており、観測点間のバランスが良いことである。図7及び8に示すようにスペクトルインバージョンで示した地盤増幅率は、地盤調査を実施して解析的に得られる増幅率に概ね一致しており、レファレンス観測網として活用が期待できる。

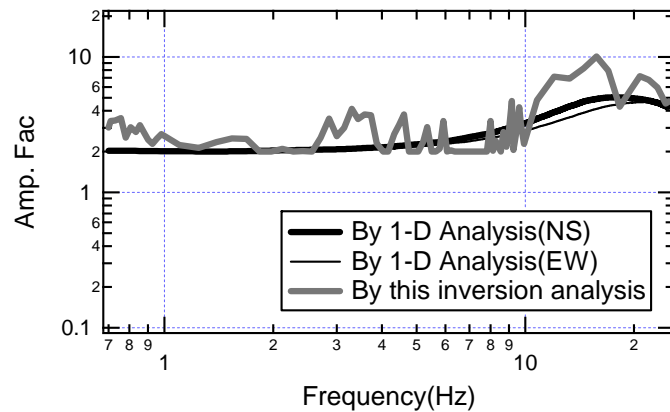


図7 S4 サイトにおけるインバージョンによる増幅率と 1-D 解析による増幅率の比較 7)

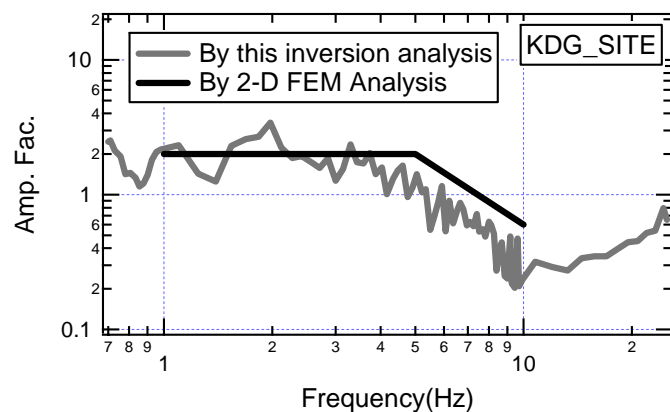


図8 KASSEM 観測網に電共研観測点 KDG サイトを加えたインバージョン解析による増幅率と KDG サイトの 2 次元 FEM による増幅率の比較 7)

b) 離散ウェーブレット変換ツールの作成

Birgoren and Irikura³⁾により提案された手法に準じた地震動推定のための統計的手法の構築のためには、解析ツールとして離散ウェーブレット変換が欠かせない。ここでは、その基本的な考え方と作成ツールについて示す。

なお、本解析ツールの基本的な考え方は、山田他⁸⁾(風速変動のウェーブレット解析、1990.4 京大防災研究年報第33号、B-1、pp285-pp295)に基づき、作成ツールは、Yamada and Okitani⁹⁾(Orthonormal wavelet analysis of turbulence, 1991, Fluid Dynamics Research 8, pp101-115)に準じた。

これらの文献によると、離散ウェーブレットを用いて時系列関数 $f(t)$ は、次式の様に

$$f(t) = \sum_j \sum_k \alpha_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (3)$$

展開することができる(ウェーブレット展開)。

ここで、 $\psi_{j,k}(t)$ は、スケール変換を2のべき乗にとり、適当なアナライジングウェーブレット $\psi(t)$ から離散的な平行移動とスケール変換によって

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), \quad (4)$$

与えられる。式中の j 及び k は、ともに整数であり、 j はスケール、 k は $k/2^j$ の形で時刻(位置)を表す。

また、ウェーブレット展開の係数 $\alpha_{j,k}$ は、離散ウェーブレットの直交性により、

$$\alpha_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{j,k}(t) f(t) dt, \quad (5)$$

として求めることができる。ここで、 $\psi_{j,k}(t)^*$ はフーリエ空間において、 $\psi_{j,k}(t)$ と共役複素数であることを示している。

)アナライジング・ウェーブレット $\psi(t)$ の求め方について

ここで用いるアナライジング・ウェーブレットは、Birgoren and Irikura により Meyer-Yamada のアナライジング・ウェーブレットと呼ばれ(6)から(10)式で構成される。

$$\psi(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) \hat{\psi}(\omega) d\omega \quad (6)$$

$$\text{ただし、} \hat{\psi}(\omega) = \exp(-i\omega/2) \times \sqrt{\left[(\hat{\phi}(\omega/2))^2 - (\hat{\phi}(\omega))^2 \right]}, \quad (7)$$

$$\hat{\phi}(\omega) = \sqrt{g(\omega)g(-\omega)}, \quad (8)$$

$$g(\omega) = h(4\pi/3 - \omega) / [h(\omega - 2\pi/3) + h(4\pi/3 - \omega)], \quad (9)$$

$$h(\omega) = \begin{cases} \exp(-1/\omega^2), & \omega \geq 0 \\ 0, & \omega \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Meyer-Yamada のアナライジングウェーブレットは、(7)から(10)に示すようにフーリエ空間において定義されていることが一つの特徴であり、図示すると図9のようになり、その絶対値は図10に示される。

したがって、(6)式に示すように $\hat{\psi}(\omega)$ のフーリエ逆変換がアナライジングウェーブレット $\psi(t)$ を与える。フーリエ逆変換は、大崎¹⁰⁾のプログラム FAST (新・地震動のスペクトル解析入門、大崎順彦著、pp229-230)により行い、図11に示した。以後、本解析ツール作成におけるフーリエ変換・逆変換は、FASTをサブルーチンプログラムとして用いる。

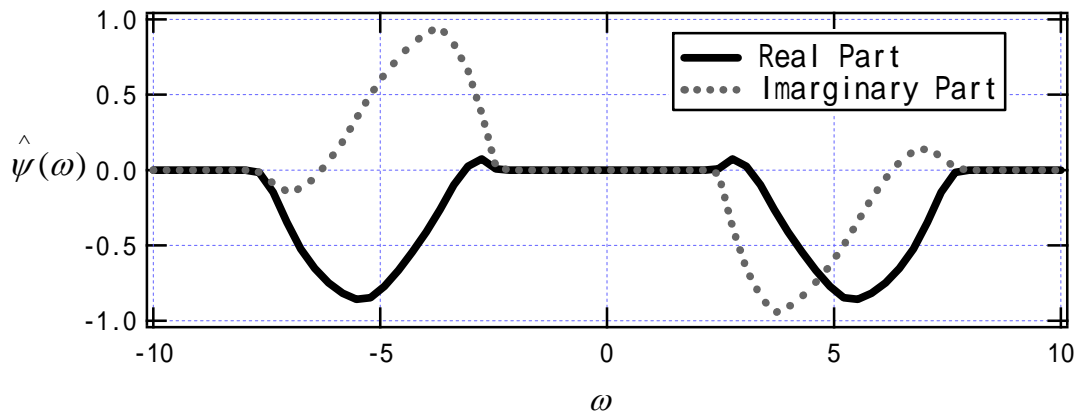


図9 アナライジングウェーブレットのフーリエ係数

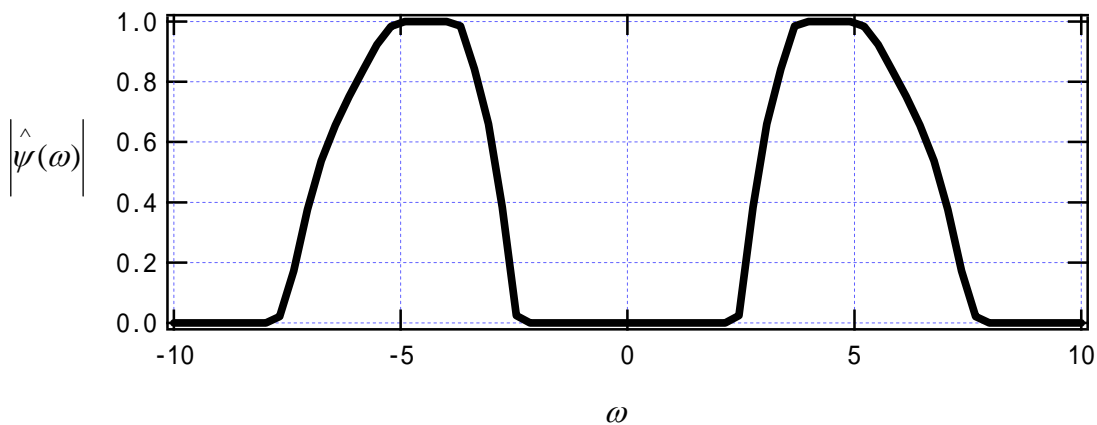


図10 アナライジングウェーブレットのフーリエ係数絶対値

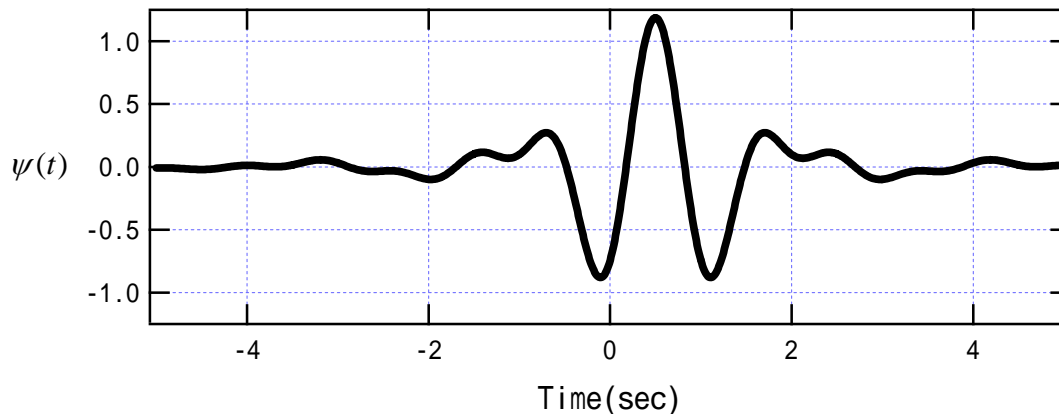


図 1 1 Meyer-Yamada のアナライジングウェーブレット

) Meyer&Yamada のウェーブレット展開係数 j_k とその逆変換について

ウェーブレット展開係数を示す(5)式は、 j を固定すると畳み込み演算であるため、フーリエ空間では、単なる掛け算に帰着し、(11)式のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 j_k &= (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\psi}_{j,k}(t)^* F(\omega) d\omega \\
 &= (1/2\pi) 2^{j/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ik\omega) \hat{\psi}(\omega)^* F(2^j \omega) d\omega
 \end{aligned} \tag{11}$$

したがって、 j_k は、 $\hat{\psi}_{j,k}(t)^*$ と $f(t)$ のそれぞれフーリエ変換されたものの積をつくり、その積をフーリエ逆変換することで求まる。

離散化データで扱う場合、それぞれフーリエ変換された係数の積を、 C_s として、 2^j サイズのフーリエ逆変換を $j=0 \sim n-1$ のそれぞれの j に対して行えばよく、(12)式で求められる。

$$j_k = \sum_{s=0}^{2^j-1} C_s e^{i(2\pi ks/2^j)} \tag{12}$$

ここで、 $k=0 \sim 2^j-1$ となる。また、時系列の離散データ個数は、 $N=2^n$ で与えられる。

(12)式のフーリエ逆変換により、 j_k が各 j 毎に時間 t を k 分割した時系列データとして得られる。

次に、 j_k が与えられているとき、(3)式にしたがって元の時系列関数 $f(t)$ を求めることが出来る。具体的には、(12)式において、 j_k を k についてフーリエ逆変換を行い、得られた C_s に $\hat{\psi}_{j,k}(\omega)$ を掛け、 t についてフーリエ逆変換を行うことにより時系列関数 $f(t)$ が得られる。

なお各 j により、アナライジングウェーブレットがサポートする周波数範囲 (図 1 0 参照、た

だし図では角振動数 ω_j (rad/s) で表示) は次式のように定まる。

$$2^j / 3T_d \leq f_j \leq 2^{j+2} / 3T_d \quad (13)$$

ここで、 f_j は j 次のサポート振動数(Hz)、 T_d は、時系列データの継続時間(秒)を表す。

また、具体的に(12)式の適用に際しては、各 j 毎の離散化データに対して $k=2^j$ 分割ではなく、 $j=0$ において解析可能なようにナイキスト振動数 f_{NyQ} 及び基本振動数 f_F を、次のように定めた。

$$f_{NyQ} = 2^{j+1} / T_d \quad (14)$$

$$f_F = 2^{j+2} / T_d \quad (15)$$

以上のプロセスにより、時系列データのウェーブレット展開により係数 $c_{j,k}$ を求め、さらにその逆変換により、元に戻すことが出来、例として具体的な時系列データによる計算結果を示す。一つは、振幅値一定で 1Hz から 10Hz まで周波数が変化するログスweep波であり、他は、JMA 神戸波(EW 成分)である。

図 1 2 にログスweep波によるウェーブレット係数を 1~10Hz をカバーする $j=7 \sim 10$ について示し、図 1 3 にその絶対値の時系列に対する変化を示す。ログスweep波は、継続時間 $T_d=40.96$ 秒で時間刻み $t=0.01$ 秒であるが、経過時間 10,20,30,40 秒ごとに周波数が、1.75,3.03,5.40,9.46Hz と変化している。ウェーブレット係数の絶対値の時系列の変遷をみるとその絶対値は、 j の 7 から 10 までログスweep波の周波数変化に対応しており、ピーク値の傾向から群遅延時間(Group delay time: T_{gr}) を評価できることを示している。また、得られた結果は、佐々木他¹¹⁾(1993)が示した結果とも良くあっている。

図 1 4 は、JMA 神戸波(EW 成分) (継続時間 $T_d=40.96$ 秒で時間刻み $t=0.02$ 秒) のウェーブレット変換による各 j 次 ($j=5 \sim 10$) の係数 $c_{j,k}$ の結果を示し、各次毎に時系列波への逆変換を行った結果と逆変換により得た時系列波は、図 1 5 に示す。逆変換においては、 $j=0 \sim 10$ のウェーブレット係数を用いており、計算された逆変換波は、元の波形に完全に一致し、変換が可逆であることを示している。

この 2 例の計算においては、解析上の継続時間は、 $2 \times T_d$ とし、後続の 0 を付加している。

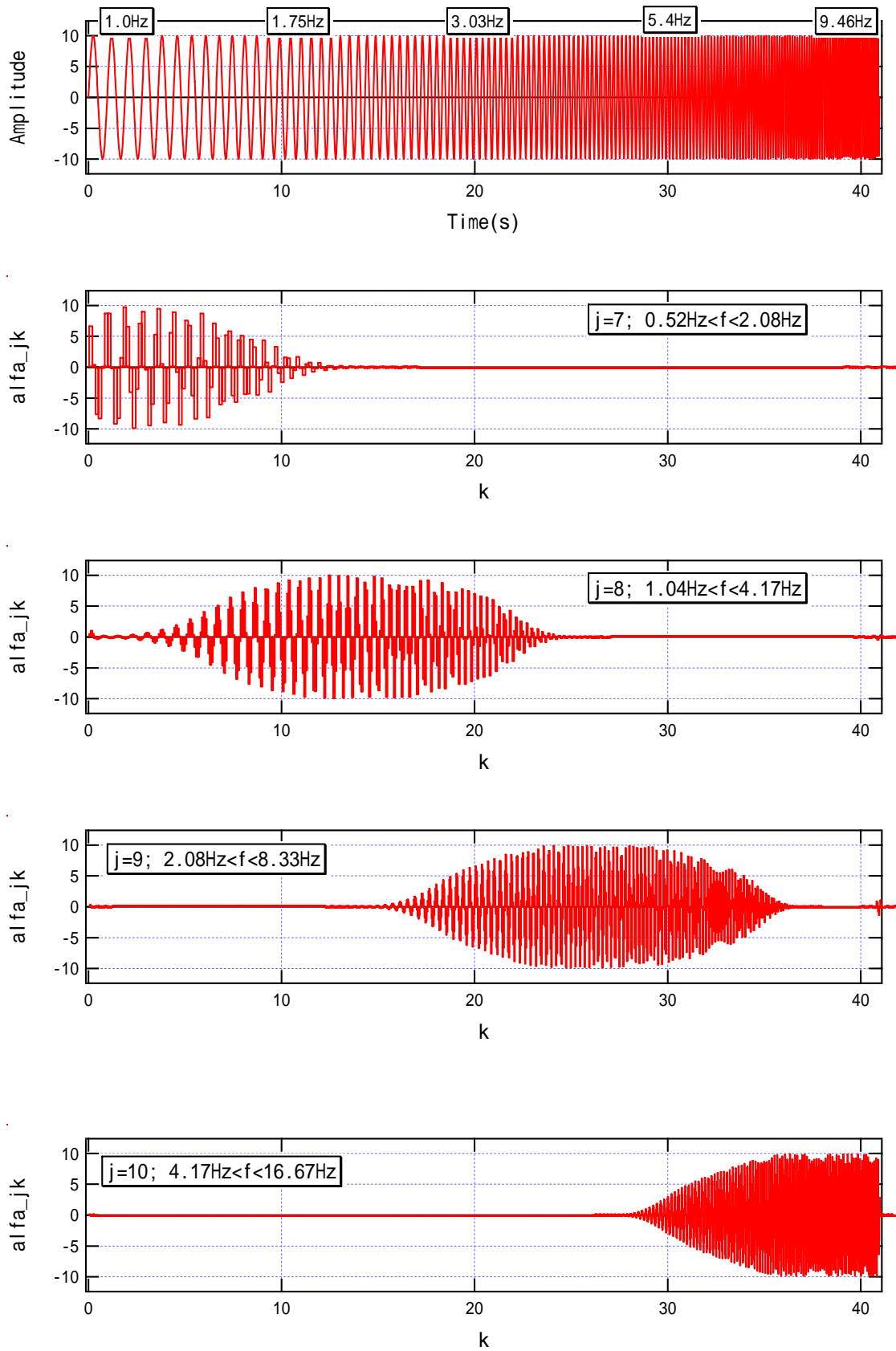


図 1 2 ログスイープ波によるウェーブレット係数 ($j=7 \sim 10$)

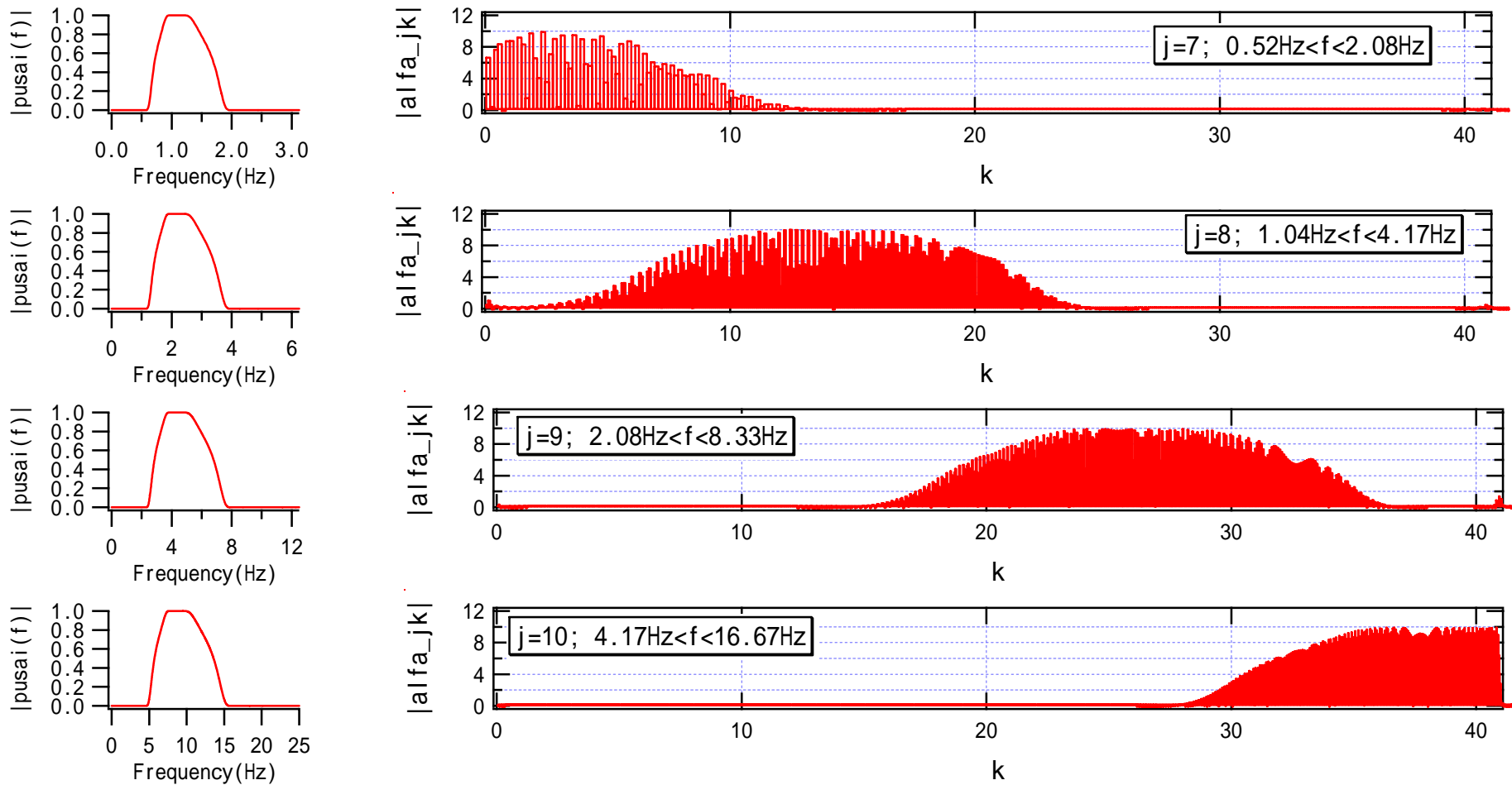


図 1 3 各 j 次のアナライジングウェーブレットのフーリエ係数の絶対値とウェーブレット係数の絶対値

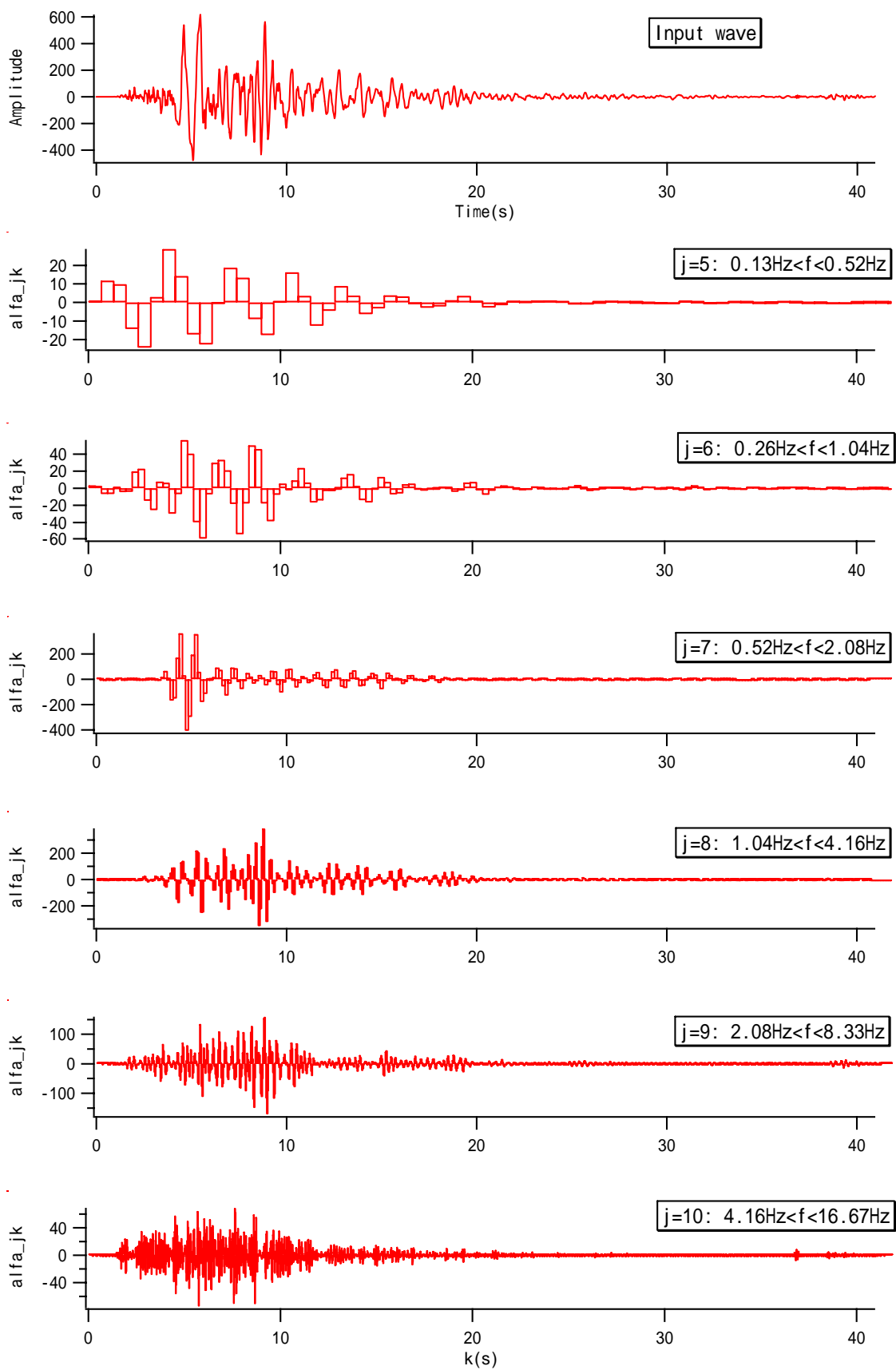


図 1 4 JMA 神戸波 (EW 成分) の各 j 次のウェーブレット係数

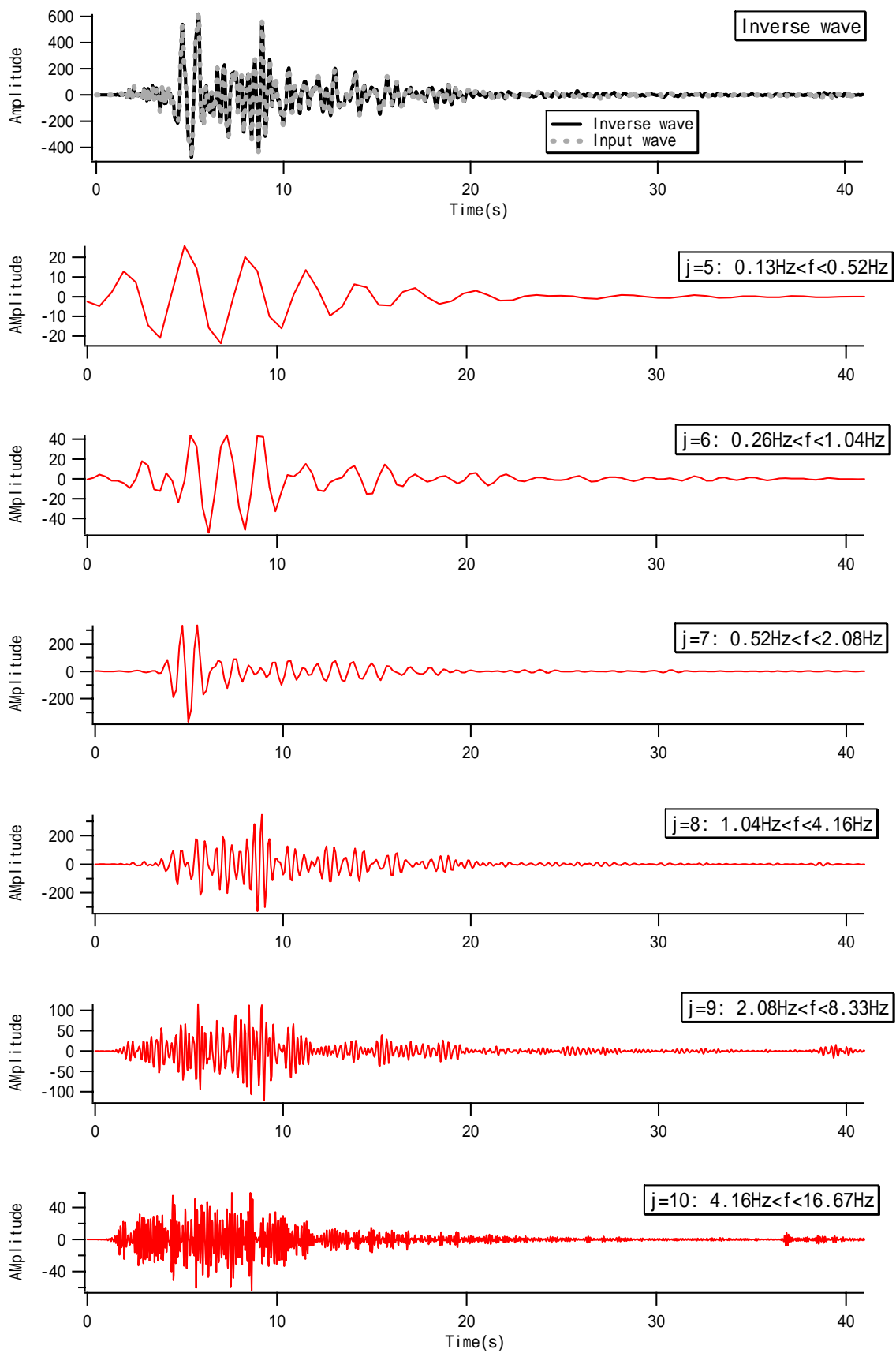


図 15 JMA 神戸波 (EW 成分) の逆変換波と各 j 次毎のウェーブレット逆変換による時系列波 (逆変換波には、原波形を重ねがき、完全に原波形に一致)

) ウェーブレット係数とパワースペクトルの関係

Birgoren and Irikura³⁾により示された地震波推定手法の基本的な考え方は、Meyer-Yamada のウェーブレット係数の値がパワースペクトル振幅値との良好な相関性を利用している点である。すなわち、次式で与えられる各 j 次のウェーブレットスペクトル振幅値 E_j が、 j 次に対応する周波数のパワースペクトル振幅値に一致することが示されている。

$$E_j = \sum_k |\alpha_{j,k}|^2 \quad (16)$$

ここで(16)式に示す j 次の振幅値に対比する振動数は、(13)式で与えられる。

図16及び17に、先に示した2種類の時系列データについて、(16)式で示すウェーブレットスペクトル値を計算し、パワースペクトルとの比較を示す。両者は、よく一致しており、本ツールの妥当性が裏付けられたといえる。

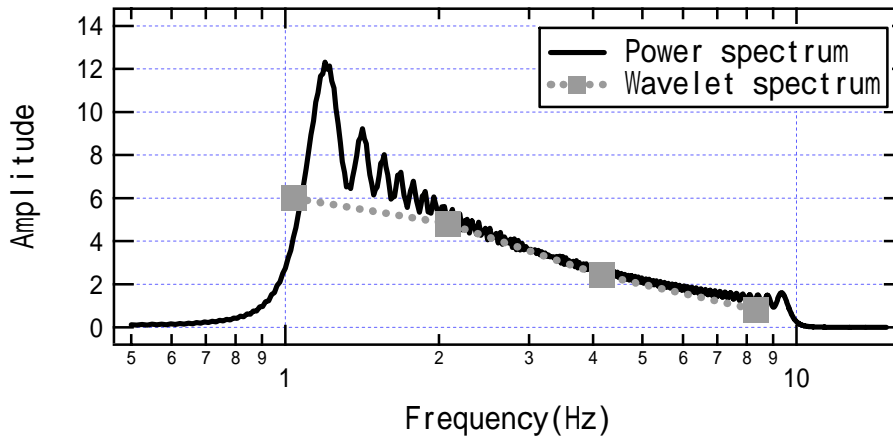


図16 ログスイープ波のウェーブレットスペクトルとパワースペクトルの比較

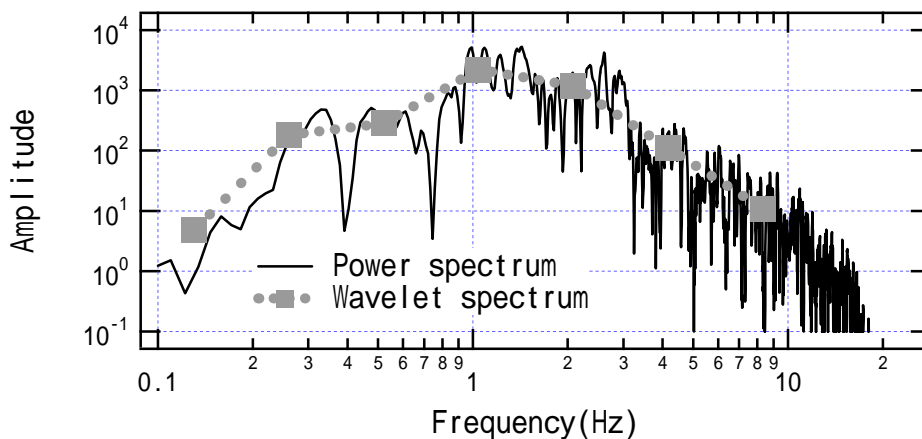


図17 JMA 神戸波(EW 成分)のウェーブレットスペクトルとパワースペクトルの比較

3) E-ディフェンスでのデータベースインターフェイスシステムの骨子の構築

三次元地震動データベースの整備については、3.6.2の三次元地震動データベースの構築において、国内外を問わず利用に制限の無い既存の地震動データが収集され、それらを格納し利用するためのシステムが開発される。あわせて、3.6.3においては、三大都市圏において今後発生が予想される大規模地震動の推定がなされ、ここで推定された地震動もデータベースシステムに取り込むことになる。また、最終的に地震動予測機能も持たせるために、簡易ではあるが、統計的手法による地震動推定法の構築も進めている。

したがって、次年度に完成が予定される三次元データベースシステムは、E-ディフェンス利用を包括しているものの、あらゆる地震動データが対象となったシステムである。

しかし、E-ディフェンスでの利用の利便性という点から、ユーザーサイドの視点からの選定地震波の基準やサイト特性、地域特性の類型化や地震動推定法の選定基準などが必要となり、また施設運営側からは、加振限界の観点からの基準が整備されることが重要である。

こうした点を踏まえて、E-ディフェンスのためのインターフェイスシステムの構築を目指す、その骨子として加振限界から、どのような基準を整備しなければならないかという点にある。本年度はその視点から整理したことを以下に述べる。

まず、加振性能の限界値と云う点からは、震動台の場合、単一正弦波加振での限界性能線が図18のように定められていることである。必ずしも入力する地震動にたいする性能線ではないので、地震動特性との関連からの判断基準をもつ必要がある。

次に、昨今話題となった長周期地震動による被害の懸念から、長周期地震動の加振性能限界と入力地震動との関連性である。図19は、加振限界性能線図から得られる長周期側の限界振幅での正弦波加振の加振可能波数を求めたものである。正弦波での加振可能波数と入力される地震動の継続時間やその主要周期の波数との関係も考慮しなければならない。

地震波加振による限界条件としては、地震動の速度と加速度の軌跡が、加振機及びサーボ弁の加振推力（加速度に等価）と加振速度で描く限界線内にあることが必要である。図20は、JR鷹取波および加振限界以内に収まる模擬地震波の速度と加速度の軌跡をサーボ弁・加振機の限界線と比較したもので、これらの地震波の軌跡は加振限界線内に入っていることを示している。

最後に加振限界の重要な条件として、消費油量の制限があり、主アキュムレータの限界値は、20000リットルとなっており、図21は、各地震動による三軸同時加振を実施した場合の消費油量を計算したものであり、JR鷹取波が最大で約15000リットルとなっている。消費油量は、速度振幅と継続時間との関連性が強く、今後の入力予定の地震動の重要なチェック項目となる。先に示した図19の正弦波の波数限界もこの油量制限によるものである。

なお、図18～21¹²⁾は、小川信行：日本振動技術協会「やや長周期地震動問題を考える」講習会資料、pp75～pp106から掲載したものである。

単一正弦波加振の限界値

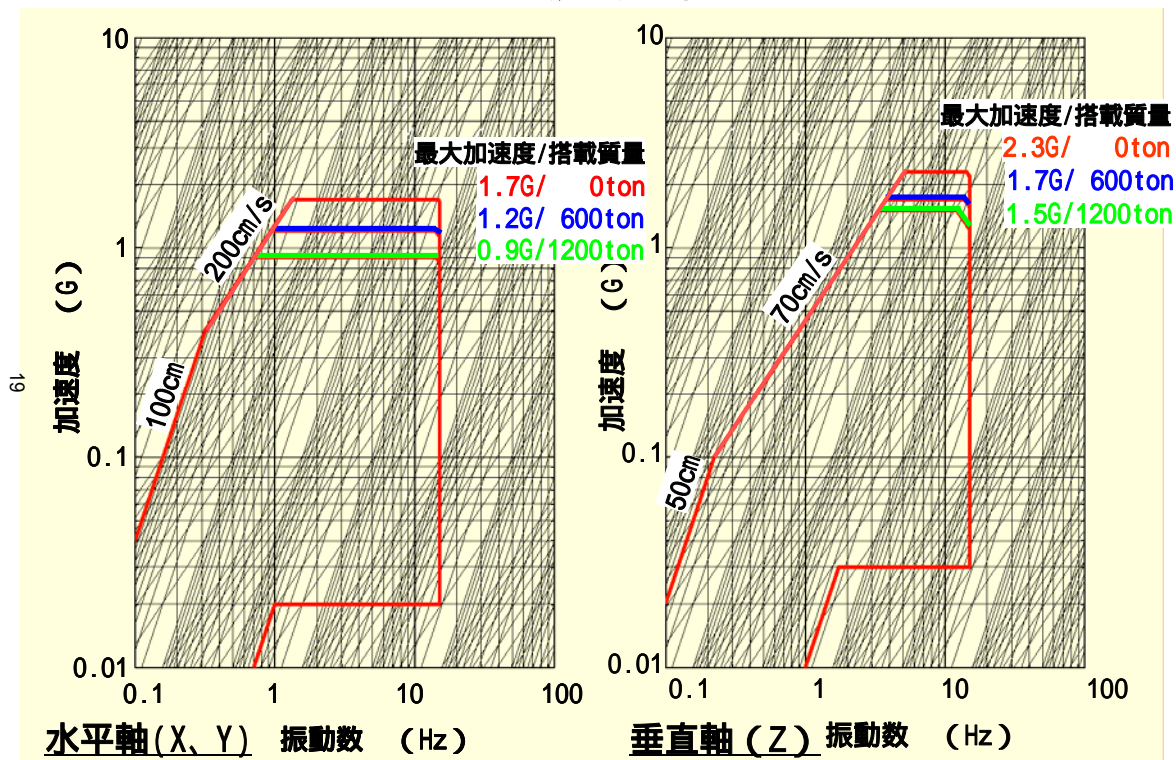


図 1 8 加振性能限界線図¹²⁾

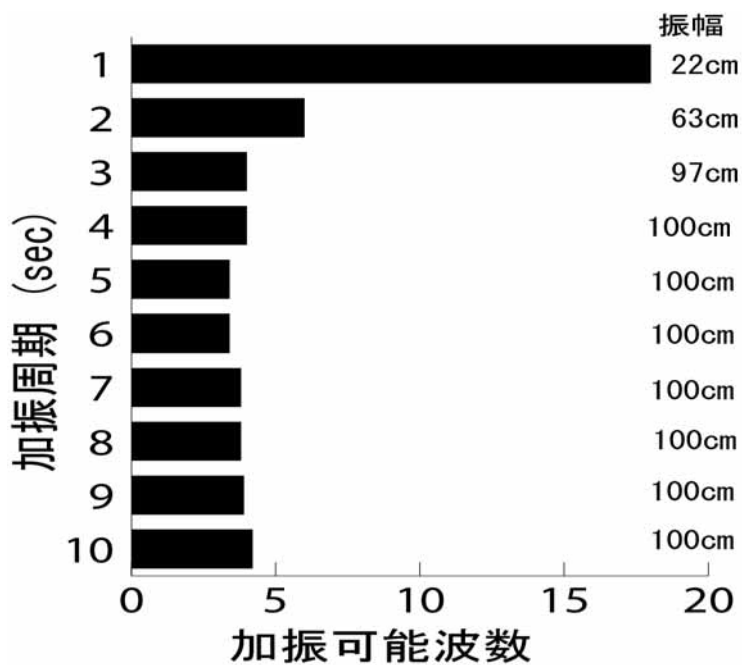


図 1 9 限界振幅値での加振可能波数¹²⁾

JR 鷹取波および模擬波の場合

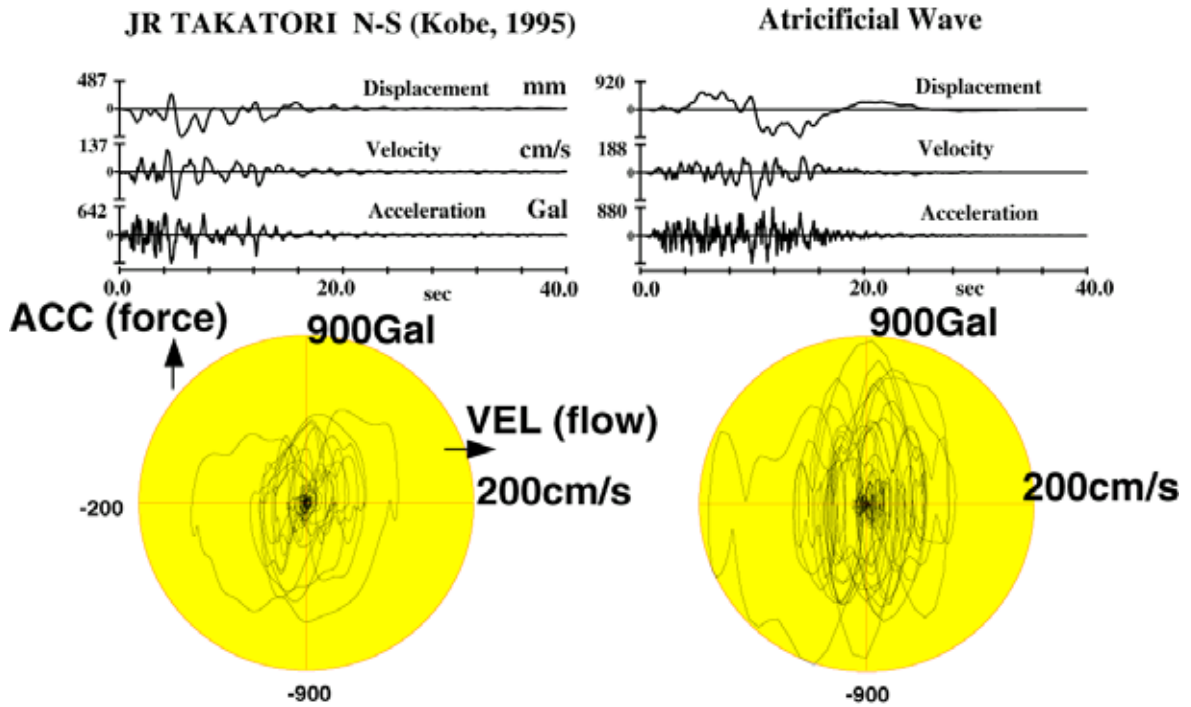


図 2.0 地震動の速度 加速度軌跡とサーボ弁の速度 加速度性能限界¹²⁾

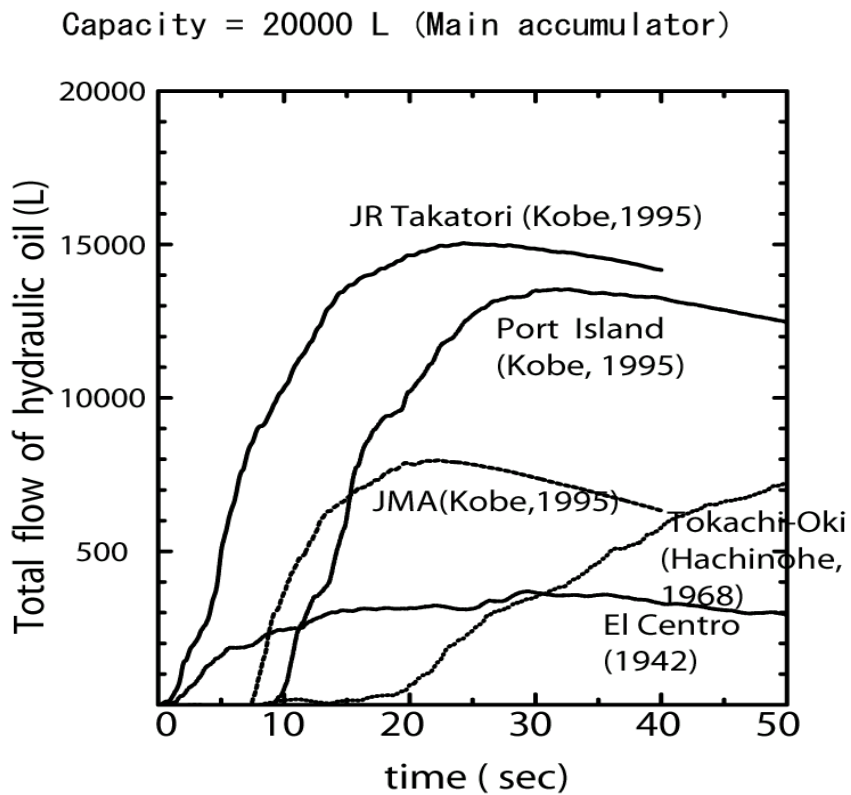


図 2.1 3 軸同時加振時の各地震波の消費油量¹²⁾

(d) 結論ならびに今後の課題

統計的手法による大地震強震動波形の予測では、位相特性の扱いに着目した。これを取り込んだ地震動推定法の構築のため、Bilgolen and Irikura が提案するウェーブレット変換を利用したサイトの位相特性に基づく波形推定法を取り上げ、Meyer and Yamada のウェーブレット変換逆変換の解析ツールを開発し、位相評価を取り入れた波形推定法のために有用であることを検証した。また、波形推定のサンプルサイトデータ群として電力中央研究所強震観測網及び KASSEM の強震観測データの収集を実施し、それらガリファレンスサイトになることが分かった。E-ディフェンス用データベースのインターフェイスシステムの骨子構築では、加振性能限界の観点からの基準整備のための要件を抽出した。

今後の課題としては、開発した Meyer and Yamada のウェーブレット変換逆変換の解析ツールを用い、サンプルサイトデータ群に K-NET 及び KiK-net のデータを加味し、位相評価を考慮した強震動波形予測法として仕上げる事、及び 3.6.2 と 3.6.3 の成果を取り込み E-ディフェンス用データベースのインターフェイスシステムの骨子構築を行うことである。

(e) 引用文献

- 1) 吉村智昭：実務から見た設計用地震動評価の現状と問題点，第 31 回地盤震動シンポジウム(2003)論文集，(社)日本建築学会 pp.81-90，2003.
- 2) 佐藤忠信、室野剛隆、西村昭彦：観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化，土木学会論文集，No.640/ -50，pp119-130，2000.
- 3) Gulum Birgoren: Strong motion simulation of the 1999 earthquakes in western turkey: Stochastic green's function technique with characterized source model and phase dependent site response, Kyoto Univ., Doctral thesis, 2004.3
- 4) 矢島浩：強震観測資料集第 1 巻(1981～1982)，電力中央研究所報告，調査報告 U90058，1991.
- 5) Shimizu.T, K. Abe, K. Kasuda and E. Ynagisawa(1988):. The development of the dense instrumental array system KASSEM and the analysis of observed earthquake waves, Proc. 9th World Conf. Earthq., Vol.8, 137-142, 1988
- 6) Abe.K, and H. Watanabe:. A study on amplification factors of earthquake motions observed at a granite site and relationships between their vertical and horizontal motions, 11th World Conf. Earthq. 1996.
- 7) Abe.K, K Yashiro, M. Mashimo, R. Nakamura, S. Sekiya, and T. Kubo: Evaluation of site amplification factors based on spectral inversion analysis, Paper No.2393, Proc. 13th World Conf. Earthq.,2004. (発表予定)
- 8) 山田道夫、樋口宗彦、林泰一、光田寧：風速変動のウェーブレット解析，京都大学防災研究所年報，No.33B-1, pp285-295, 1990.
- 9) Yamada.M and K. Ohkitani: Orthonormal wavelet analysis of turbulence, Fluid Dynamics Research 8,pp101-115, 1991.

- 10) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，第6刷，pp229-230，2000.
- 11) 佐々木文夫、前田達哉：データ解析におけるウェーブレット変換の基本的性状の検討，日本建築学会構造系論文報告集，第453号，pp197-206，1993.
- 12) 小川信行：やや長周期地震動に関する振動試験，日本振動技術協会「やや長周期地震動問題を考える」講習会資料，pp75～pp106，2004.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
K. Abe K Yashiro M. Mashimo R. Nakamura S. Sekiya T. Kubo	Evaluation of site amplification factors based on spectral inversion analysis	Paper No.2393, Proc. Of 13th World Conference on Earthquake Engineering	2004.8 (発表予定)

(g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア

名称	機能
Meyer-Yamada のウェーブレット変換逆変換プログラム	時系列信号をウェーブレット変換によりウェーブレット係数を求め、そのウェーブレット係数を用いた逆変換により時系列信号に戻す。

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 16 年度業務計画案

(a) 業務計画

1) 収集強震動記録に基づく統計解析

電力中央研究所強震観測網及び KASSEM 観測網データに K-NET 及び KiK-net のデータを加味し、位相評価を考慮した強震動波形予測法として仕上げるため振幅および位相の成分間差異検討を統計的手法によりおこなう。

2) データベース化のためのインターフェイス検討

E-ディフェンス用データベースのインターフェイスシステムの骨子構築を、実験ユーザーサイドからの要件整理として3.6.2で完成するプロトタイプデータベースシステムに基づき行い、あわせて加振限界性能面から整理された要件にたいする基準整備を進める。

(b) 実施方法

1) 収集強震動記録に基づく統計解析

KASSEM 観測網データに K-NET 及び KiK-net のデータを加味し、スペクトルインバージョン解析により震源特性、伝播特性、サイト特性の分離を行う。同時にウェーブレット解析を実施し得られたウェーブレット係数を震源特性と伝播特性の積で割ったサイト特性によるウェーブレット係数に対して、地震マグニチュード、震源距離、弾性波速度等との相関性を検討し、統計解析を行う。

電力中央研究所強震観測網データについても同様にサイト特性によるウェーブレット係数を求め統計解析を実施する。

上記の検討からサイト特性によるウェーブレット係数を個別サイトに対して定め、ウェーブレット逆変換によりサイト固有の波形を求める手法を構築する。

2) データベース化のためのインターフェイス検討

E-ディフェンス用データベースのインターフェイスシステムの骨子構築を、実験ユーザーサイドからの要件整理と加振限界性能面から整理された要件にたいする基準整備を行う。

実験ユーザーサイドからの要件整理として、3.6.2 で完成するプロトタイプデータベースシステムに基づき、地震諸元、選定波形、サイト特性、地域特性などの類型化や波形特性確認ツールについて検討する。

加振限界性能面から整理された要件に基づき、波形選定のための基準を単一正弦波ではなく地震動波形特性を考慮して定める。

(c) 目標とする成果

ウェーブレット係数の統計解析などの検討から、地震波の位相変動の主要因であるサイト特性に起因する地震波の波形合成手法を構築する。また、実験ユーザーサイドからの要件整理と加振限界性能面から整理された要件にたいする基準整備を行い、E-ディフェンス用データベースのインターフェイスシステムの骨子構築を行う。