3.4 断層帯周辺における強震動予測の高度化のための研究

3. 4-1 震源断層モデル・地下構造モデルの高度化

(1)業務の内容

(a) 業務題目 震源断層モデル・地下構造モデルの高度化

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人九州大学	准教授	竹中 博士

(c) 業務の目的

微動観測・解析とサブテーマ1~3により得られる情報を最大限に活用してより信頼度 の高い警固断層帯(南東部)の強震動予測を得るための地下構造モデルと震源断層モデル を高度化する。

(d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成 23 年度:

地下構造に関する既往情報の調査・収集をサブテーマ2と協力して進めるとともに、警 固断層周辺域において微動アレイ探査による構造解析を行った。微動アレイ探査は、福岡 平野において(過去に微動観測で得たデータを有効活用するとともに、追加観測を実施し) 5地点の探査地点の基盤深度及び堆積層内のS波速度構造情報を推定した。またさらに、 筑紫平野北部の1地点において浅部から深部までをターゲットにした広帯域の位相速度を 得るための微動アレイ探査を行い、探査地点のS波速度構造モデルを推定した。

2) 平成 24 年度:

数値モデル化を視野に入れて,平野を面的にカバーできるように探査を追加するととも に、既存の微動アレイ観測記録を活用し福岡平野および筑紫平野北部の3次元速度構造モ デルの構築への基礎的情報の蓄積化を行う。そして、集積した情報をもとに警固断層帯南 東部周辺域の3次元構造の数値モデル化を行う。

3) 平成 25 年度:

サブテーマ2より期待される地下の3次元的な震源断層面形状モデル、サブテーマ1、 サブテーマ3で期待される断層活動のセグメント構造、分岐形態、断層変位の空間変化に 関するデータ、及びそれぞれの既存研究結果等を考慮した警固断層帯固有の地震シナリオ に基づき、震源断層モデルを高度化する。

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

深部地盤を中心とする強震動予測に利用可能な広域の構造モデルについての調査を進め

るとともに、構造モデル作成のための速度構造情報を得るため警固断層周辺域において微 動アレイ探査による構造解析を行った。福岡平野においては、福岡市中心部およびその周 辺部で5地点(福岡市博多区月隈、福岡市南区長住、粕屋郡粕屋町長者原、福岡市博多区 博多駅南、福岡市中央区今泉・天神)で微動アレイ探査を実施した。また、警固断層南東 部延長上に位置する筑紫平野北部中央の1地点(三井郡大刀洗町)にて微動アレイ探査を 実施した。各地点で得られた常時微動記録を用いて解析を行い、位相速度を算出した。そ こからは,各地点とも連続性の良い位相速度の分散曲線が得られた。さらに、その分散曲 線から1次元のS波速度構造を推定した。その際には、数値計算用地下構造モデルの構築 を視野に入れ、S波速度(以下,Vs)3km/s相当の地震基盤とその上の1~3層の堆積層構 造を推定した。こうして、福岡平野中心部5地点、筑紫平野北部1地点の速度構造が得ら れた。

(b) 業務の実施方法

1) 地下構造に関する既往情報の調査

ボーリング情報など浅部地盤構造についてはサブテーマ2が調査するので、本サブテ ーマでは深部地盤を中心とする強震動予測に利用可能な広域の構造モデルについて調 査した。

2) 微動アレイ探査

福岡平野では、2005年3月の福岡県北西方沖の地震(M7.0)以降、警固断層に関する長期 評価や地震動予測が実施されている(例えば、川瀬・他(2003)、森川・他(2008)。そこで 用いられた地下構造モデルは、現存する地下構造情報を統合して構築されたものと考えら れるが、根拠となる物理探査情報に乏しく、多くの部分で推定や空間補間がなされている と推測される。特に、地震動評価において重要なパラメータの一つであるS波速度(Vs)の 情報に関しては、情報が極めて少ない。従って、本業務では、福岡地域でのより精度の高 い地震動評価を可能にするために、平野内部と端部をバランスよく配置した複数箇所での 微動アレイ探査(例えば、岡田(1998))を実施した。また、一方、警固断層南東部延長上 に位置するだけでなく、福岡県北西方沖の地震の際に周辺地域に比べやや強く揺れたこと が指摘されている筑紫平野でも地下構造探査を実施した。この平野に関しては、耳納断層 近傍を除き、地下構造の物性に関する既往の調査研究は見当たらない。これら両平野にお ける今年度に探査の実施は、福岡平野5地点(TKG:福岡市博多区月隈、NGZ:福岡市南区長 住、CJB: 粕屋郡粕屋町長者原、HKT:福岡市博多区博多駅南、TJN:福岡市中央区今泉・天 神)、筑紫平野北部中央の1地点(TCA:三井郡大刀洗町)にとした。これらの位置を図1 に示す。図1には、過去の微動アレイ探査位置(KU:九州大学)も記す。

本業務で活用した微動アレイ探査は、深い地盤のS波速度構造を解明する有力な手法の 一つであり、開発の進んだ都市部での活用に特に有効的である。すでに多くの探査事例が 存在し(例えば、山中・他(1994))、本業務においてもその手法を活用することとした。 その手続きのフローを図2に記す。

図1の探査地点における観測には、7~9台の観測装置を大小2つの三角形の頂点とその重心(厳密な重心ではないので以下、中心と記す)位置に配置し常時微動の同時収録をしているが、解析にF-K法(周波数波数スペクトル法: Capon、1969)を用いているため、配

置形状に任意性がある。そのため開発の進んだ都市部向けの測定法であるともいえる。本 業務のアレイ観測の諸元を表1に示す。表1の位置は各探査地点の中心位置である。各探 査地点では、中心位置を各アレイで共通にし、事前情報や観測地の状況に応じて配置を決 定した。福岡平野では、平野の中央に位置し、堆積層厚数百m程度と考えられ、かつ繁華 街の中心でノイズの多い地点である HKT、T.IN では約 1500mから十数mの観測機器設置点 間隔のアレイを大(L)アレイ、中(M)アレイ、小(S)アレイの3種を設定し、一つのアレイ毎 に同時観測を行った。また、その他の探査地点については、数百mから数十mの間隔の大 (L) アレイ、小(S) アレイの2種のアレイを設定した。また、筑紫平野では、堆積層厚は2000m 程度と予想されたため、やや間隔の大きい3段階の配置をとった。こうした配置間隔は、 位相速度の推定可能な最大波長に関係し、おおむねこの解析方法では4~5倍程度といわ れている(岡田、1998)。これら各探査地点での観測点配置詳細を図3~8に示す。これ らの図に示す位置は、機器を設置した地点であり、各地点の現場状況に応じて、安全性と データの質への影響が出ないように設置点を配慮した。各地点とも大半の設置点に人員を 配置し、周辺住民への配慮を行うとともに、設置場所の地面がコンクリートやアスファル トなど強固で安定した場所に設置した。

観測には、アカシ製の加速度上下動計(JPE6)と白山工業製データロガー(LS8800)およ び外部アンプ(500 倍の設定)を組み合わせ、図9のようにアルミ製のボックスの中に収 納されたものを使用した。収録は、100 Hz サンプリングで、アレイ配置に応じて、20~90 分間行った。図9は、9台を1か所に集めて同時収録を行うハドルテストを行っている際 の写真である。データロガーの時刻は、GPS 信号で校正させ、機器間での時間差が 1/100 秒以下になるようにした。また、位置情報の取得には、ハンディ GPS を使用し、設置点間 隔の数%以内の誤差になるようにした。観測時は、風の弱い晴天日とし、繁華街である HKT と TJN および TCA では深夜に、それ以外では日中に実施した。



Basin	Cite ande	Location	of No.7	Station S	Oha Tima		
Dasin	Site code	Long.	Lat.	Max.	Min.	Obs. Time	
Fukuoka	TKG	130.46327	33.56787	749	40	day	
Fukuoka	NGZ	130.40042	33.54810	710	57	day	
Fukuoka	CJB	130.46532	33.61968	1036	80	day	
Fukuoka	HKT	130.42610	33.58114	1357	13	night	
Fukuoka	TJN	130.39995	33.58575	1416	29	night	
Chikushi	TCA	130.63563	33.36525	2699	48	night	

表1 微動アレイ観測の諸元



図2 本業務の作業フロー



図3 福岡市博多区月隈(TKG):観測点位置と配置詳細



図4 福岡市南区長住(NGZ):観測点位置と配置詳細(7は各アレイの中心)



図5 粕屋郡粕屋町長者原(CJB):観測点位置と配置詳細(7は各アレイの中心)



図6 福岡市博多区博多駅南(HKT):観測点位置と配置詳細(7は各アレイの中心)



図7 福岡市中央区今泉・天神(TJN):観測点位置と配置詳細(7は各アレイの中心)



図8 TCA:三井郡大刀洗町 観測点位置と配置詳細(7は各アレイの中心)



図9 観測機器写真例(左:9台を並べてハドルテスト、右:観測時の機器設置状況)

以上の観測から得られた記録のうちノイズ等の少ない良好な記録の7地点の常時微動波形とフーリエスペクトルを図10~15に示す。ここで示すものは、複数の観測地点で同時に収録した記録の一部で、加速度計で得られた記録を速度波形に積分するとともに(TCAは加速度波形)、図10~15に示す波形は、長周期成分を強調するために周期0.5~7.0 s(NGZ、CJBは0.3~7.0 s)のバンドパスフィルター処理を施したものである。

各図左の波形からは、いずれの探査地点においても、定性的にはコヒーレントな波形 が得られ、また、各図スペクトルからも、一部短周期成分でややばらつきが見られるが、 概ね広帯域にわたり揃いの良い記録が得られていることが分かる。また、アレイの中で のスペクトル性状の大きな違いも見られず、微動アレイ解析に適切な記録であることが 判断できる。なお、周期1秒以上の長周期側での卓越周期は、福岡平野のTKGやTJNで4 ~5秒、NGZで2~3秒、CJBやHKTで2~4秒、筑紫平野のTCAで2~3秒程度であった。



図 10 TKG での速度波形とフーリエスペクトル



図 11 NGZ での速度波形とフーリエスペクトル



図 12 CJB での速度波形とフーリエスペクトル



図 13 HKT での速度波形とフーリエスペクトル



図 14 TJN での速度波形とフーリエスペクトル



図 15 TCA での加速度波形とフーリエスペクトル

観測された微動の上下動成分のアレイ記録を解析対象のSアレイで81.92秒間、MおよびL アレイで163.84秒間の10~22個のデータセットに分割した。なお、解析時の採用する記録 区間は、交通振動等によるパルス状のノイズの混在しない記録を目視等により採用した。 それぞれのデータセットに対して、周波数波数スペクトル解析(Capon、1969)を行い、周波 数波数スペクトルを求めた。その結果の各周波数でのスペクトルのピークでの波数ベクト ルから位相速度を算出した。これらの操作を周期毎に行い、レイリー波の位相速度の分散 曲線を得た。各探査地点の位相速度を図16~21に示し、その際の周波数波数スペクトルの 例も示す。得られた位相速度の周期範囲は、探査地点毎に異なるがTKGで0.23~0.5 s、NG Zで0.24~0.37 s、CJBで0.24~1.2 s、HKTで0.21~1.0 s、TJNで0.33~1.2 s、TCAで0.2 ~2.0 sであった。HKTやTJNでは速度で2.5 km/sを超えるのが周期1.0 s前後であるのに対 し、TKGやNGZでは0.4 s前後で達し、ほぼ同様な変化をしている。また、CJBについては、 全般的になだらかな速度変化をしている。これらの結果は、各地点の地下構造を反映して いると考えられ、HKTやTJNに比して、TKGやNGZでは堆積層が薄いことを表している。また、 CJBではこれらの地点とは若干異なる様相を示していることが分かる。福岡平野の複雑な地 下構造を反映しているともいえる。また、筑紫平野のTCAでの位相速度は福岡平野に比べ、 速度変化が緩やかであり、堆積層の厚い傾向を反映している。ただし、一部ばらつきが大 きく凸凹しており、連続性の弱い帯域も見られる。なお、周波数波数スペクトルでは、幾 分複雑な形状を呈する周期もあるが、各地点・各周期ともスペクトルのピーク値(図中の ×印)を採ることができ、連続的な位相速度の分散曲線が得られている。





(c) 業務の成果

1) 既往の広域地下構造モデル調査

地震調査研究推進本部が配布している全国規模の J-SHIS(防災科学技術研究所地震ハ ザードステーション, http://www.j-shis.bosai.go.jp/)のモデルの他に少なくとも福 岡県全域をカバーする広域構造モデルとして、福岡県が平成7年度から平成9年度にか けて実施した「地震に関する防災アセスメント調査」において地震被害予測のために作 成した地震基盤(Vs=3.0 km/s 相当)の深度分布モデル(基盤構造)と表層地盤モデル

(地震基盤以浅の深部地盤構造を一部含む)があり、2005年福岡県西方沖地震(警固断 層帯北西部の地震)の発生を受けて再度実施されたアセスメント調査でも使用されてい る(福岡県,2006)。しかし、作成当時(14年以上前)基盤に達するボーリングデータ や大規模地震探査による基盤構造の解析結果等が無いため、炭田地帯の地質文献、屈折 法弾性波探査結果や重力探査などから基盤の形状を推定して作成されたもので、現在の J-SHIS モデルの精度に及ばないため平成23年度新たに実施されたアセスメントでは、 地震基盤モデルとして J-SHISモデルが採用されている。現在のJ-SHISモデル(通称0.5 次モデル)は、旧 J-SHISモデル(通称0次モデル)を主に H/V スペクトル比を用いて 更新したもので、地震調査推進本部による警固断層帯の強震動予測(北西部は2005年 福岡西方沖地震の検証)でも使用されている。そこで、本サブテーマで実施した微動ア レイ探査の解析においてもJ-SHISモデルを比較対象とした。また、次年度計画の数値 構造モデルの作成においても基準参照モデルとして採用する方針であったが、最近、長 周期地震動予測地図 2012 年試作版に利用された全国1次地下構造モデル(暫定版)が 公開された(http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/index.htm)の で次年度はこれを基準参照モデルとすることを検討する。1次地下構造モデルは、現在 の J-SHIS モデルを地震動シミュレーションにより更新したもので、深部地盤だけでな く沈み込むプレートの構造も含んでいる。

2) 微動アレイ探査

図 16~21 で示した常時微動の観測記録から算出した位相速度をもとにして、遺伝的 アルゴリズム(山中・石田、1995)により逆解析を行い、1次元S波速度構造を推定し た。逆解析の際には、レイリー波の基本モードのみを仮定し、位相速度の観測値と理論 値の差の2乗和が最小になるようにモデルパラメータを決定した。最適化するパラメー タは、各層のS波速度と層厚とし、表2に示す福岡平野内で共通の探索範囲を設定した。 ただし、福岡・筑紫平野ともに J-SHIS に深部地盤モデルが示されてはいるものの、全 般的に Vs3km/s 相当層の地震基盤までの速度構造の詳細は不明であり、本業務の主眼は 地震動シミュレーションによる地震動評価を目的とした地下構造の数値モデルを作成 することにあるため、ここでは、堆積層数は極力少なく仮定した。また、最下層の速度 値を 3 km/s 以上になるようにパラメータを設定するとともに、探索範囲を広く設定し た。各層の密度値は他の堆積平野の値を参照に各層で一定値を与え、P波速度は既往の 実験式(狐崎・他、1996)によってS波速度と連動させた。また、位相速度の様子から TKG と NGZ は2層ないし3層モデルを、CJB、HKT、TJN では3層ないし4層モデルを仮 定した。TCA については、事前情報が福岡平野よりも少ないため、表3のようにP波速 度、S波速度、層厚の各値に幅を設け、密度値のみを固定し逆解析を行った。

図 22~27 に、各探査地点で微動アレイ観測記録をもとにした逆解析から推定された 速度構造および観測位相速度が逆解析モデルに対する基本モードのレイリー波の理論 位相速度の比較を示す。また、表4~9に推定された各速度構造の物性値を示す。観測 位相速度のエラーバーは、複数のデータセットにおける位相速度の標準偏差を表す。

TKGでは、2層と3層モデルの仮定のもと、図22のような結果が得られ、Vs0.7~0.8 km/s 程度の工学的基盤相当の第1層が層厚0.1 km 程度で、その下部に地震基盤相当層 が存在するモデルが得られた。これらのモデルは、位相速度の比較において、概ね観測 を説明できるモデルであることが分かる。なお、3層モデルの第2層目の層厚は非常に 薄いため、2層の速度構造として扱うのが妥当と考えられる。速度値および層厚値に若 干の差異はあるものの、J-SHIS で示されているモデルとも対応がよい結果となった。

NGZ での結果を図 23 に示す。NGZ でも TKG と同様に、Vs0.8km/s 層が層厚 0.1 km 程度 存在し、その下部には地震基盤層が存在するモデルとなった。なお、2 層モデルと3 層 モデルの位相速度のへの影響は周期 0.5 s以上であるが、得られた観測位相速度は周期 0.4 s 以下までであるため、どちらのモデルが適当かは判断できないが、TKG の結果を 考慮すれば、2 層モデルのほうがモデル化をしやすいといえる。J-SHIS のモデルとの比 較では、深さ 0.1 km の中での差異がみられるが、全体傾向としては、よく似た結果と なった。

CJB では、観測位相速度の速度変化が TKG や NGZ とは明らかに異なるため、地震基盤

までには中間層が存在することが考えられ、3層と4層のモデルを設定した。その結果 を図 24 に示す。この両者の違いは小さく、差は4層モデルの第3層の Vs2.5km/s 層の 有無のみとみても差し支えないと考えられるが、地震基盤上面までの深さは、前者で 0.69 km、後者で 0.76 km となる。また、位相速度の再現の程度についても、両者の差 異は小さく、いずれも良好で観測記録を十分に説明できるものになっており、現段階で はどちらが妥当かは判断ができない。J-SHIS モデルとの比較では、ここでの結果に対し て、第1層目の速度値・層厚値ともに小さく、第2層目は速度値が大きくなっている。 また、最下層の速度値は逆に小さい。

HKT での結果を図 25 に示す。HKT も 3 層と 4 層のモデルを仮定した。地震基盤までの 間には Vs0.7km/s(工学的基盤相当層)と 2.7~2.8 km/sの層があげられ、4 層モデル で得られた Vs1.4 km/s 層は非常に薄く求められた。ただし、位相速度の比較において は、周期 0.4 s および 0.8 s 付近での観測値の再現度が十分でない点がある。J-SHIS の モデルとの比較では、地震基盤までの中間層に差異が見られるが、第 1 層目の速度値層 厚値および Vs=3 km/s 付近の層の速度値はほぼ対応している。

TJN の結果を図 26 に示す。TJN でも、3層と4層のモデルを仮定した。3層モデルで は Vs=0.6 km/s と 1.8 km/s、4層モデルでは Vs=0.5 km/s、1.8 km/s、2.5 km/s の各層 が、いずれも 0.1 km 以上の厚さで存在するモデルが得られた。地震基盤上面までの深 さは、前者で 0.8 km、後者で 1.1 km となり、やや差異が大きい。位相速度の比較にお いては、概ね観測記録をいずれのモデルでも再現できているといえるが、周期 0.7 s 付 近および 1.2 s 付近でずれが見ら、現段階ではどちらのモデルが適当かについては判断 できない。なお、TJN については、第1層目の速度値が小さく 0.5~0.6 km/s で、他の 4 点の 0.7~0.8 km/s とは異なる。TJN 周辺は探査地点の中でもっとも博多湾に近く、 福岡平野内を流れる那珂川の堆積物の存在が予想され、より低速度の層の存在も考えら れる。ここでの結果は、J-SHIS のモデルに対して、比較的速度コントラストの大きいモ デルとなっており、第1層と地震基盤の間の中間層に大きく差異のあるものとなった。 なお、山田・他 (2009)での天神地区での表層地盤をターゲットにしたごく小規模の微動 アレイ探査結果によると、周期 0.3 s 付近で位相速度を 0.42 km/s としており、短周期 部分での今回の結果との整合性が高く、これらの位相速度を考慮した再度の逆解析も今 後必要になると考えられる。

TCA については、筑紫平野での唯一の探査地点である。J-SHIS のモデルでは、地震基 盤上面までは2kmを超え、また、KiK-net の深層 PS 検層においても深さ 0.4 km でも着 岩していないことが示されており、福岡平野に比べて、厚い堆積層の存在が推定される 地域・地点である。従って、今回の結果に際しては、速度構造解明の初期解析として、 J-SHIS で示されている速度構造を参照し、顕著な層を層数として設定し、速度値と層厚 を算出している。その結果を図 2 7 に示す。Vs=0.5、1.5、2.4、2.6、3.0 km/s の 5 層 モデルが得られた。最下層の速度値が福岡平野と比してやや小さいが、地震基盤相当上 面深さは、約 2.2 km と深い盆地構造を呈していることが示された。位相速度の比較に おいては、概ね観測記録を再現できているといえる。

以上をまとめると、福岡平野5地点、筑紫平野1地点でのアレイ観測により得られた 位相速度を満たすS波速度構造モデルを推定することができた。福岡平野では、TKG、 NGZ は平野の端部に位置するような地震基盤までが非常に浅い構造となり、HKT や TJN では逆に、やや深い構造が得られた。また、CJB では、福岡平野の他の4地点とは異なる様相を呈していた。なお、木下・他(2001)による微動アレイ探査結果(図1の KU の 位置付近)では、最下層の Vs が 2.3 km/s 程度となっていたが、今回の HKT と TJN の中 間的な速度構造が示されていた。福岡平野の地震基盤構造は、関東や大阪平野に比べれ ば、数百mとずっと浅く、かつ、水平方向への広がりも小さいと考えられているが、警 固断層に平行する複数の谷形状をしているともされ(J-SHIS 深部地盤構造図参照)、地震 基盤構造等は非常に複雑であると考えられる。また、筑紫平野内の TCA については、福岡平野よりも深い盆地構造が得られた。こうした結果がどの程度妥当であるか、また、 どのように3次元での数値モデル化をしていくかについては、追加観測や観測位相速度 データをもとにした速度構造の見直しを含め今後の検討課題としたい。

表2 福岡平野の地点で逆解析に設定した探索範囲 左から2層、3層、4層のモデル (2層モデルはTKG、NGZで、3層モデルは全点で、4層モデルはCJB、HKT、TJNで設定)

Vs(km∕s)	Thickness(km)	ρ (g/cm³)	Vs(km∕s)	Thickness(km)	$\rho \; (g/cm^3)$	Vs(km/s)	Thickness(km)	$\rho \; (g/cm^3)$
0.4-1.2	0.001-0.5	1.9	0.4-1.2	0.001-0.5	1.9	0.4-1.2	0.001-0.5	1.9
2.2-3.6	_	2.5	1.6-3.0	0.001-1.0	2.3	0.8-2.4	0.001-1.0	2.0
			2.8-3.6	-	2.5	2.0-3.0	0.001-1.0	2.3
						2.6-3.6	-	2.5

	Vp(km/s)	Vs(km/s)	Thickness(km)	$\rho ~(g/cm^3)$
1	1.6-2.6	0.4-1.2	0.001-1.0	1.9
2	2.2-3.4	0.8-1.6	0.001-1.0	2.2
3	3.4-4.5	1.6-2.4	0.001-1.0	2.4
4	4.5-5.5	2.4-3.2	0.001-1.0	2.6
5	5.5-6.0	3.0-3.5	-	2.7

表3 筑紫平野の地点(TCA)で逆解析に設定した探索範囲



図 22 TKG のS波速度構造、観測位相速度と逆解析モデルから算出される位相速度の比較



図 23 NGZ のS波速度構造、観測位相速度と逆解析モデルから算出される位相速度の比較



図 24 CJBのS波速度構造、観測位相速度と逆解析モデルから算出される位相速度の比較



図 25 HKT のS波速度構造、観測位相速度と逆解析モデルから算出される位相速度の比較



図 26 TJNのS波速度構造、観測位相速度と逆解析モデルから算出される位相速度の比較



図 27 TCA のS波速度構造、観測位相速度と逆解析モデルから算出される位相速度の比較

これまでの結果を受けて、ここでは福岡平野内の地点について、地震基盤速度値のみを 固定して再度逆解析を行った結果を示す。固定した地震基盤速度は、5地点の最下層の平 均値(表4~8の計10モデルの平均値)を採用し、Vs値を3.4km/sとした。また、層数 については、TKG と NGZ では 2 層構造、CJB、HKT、TJN では 4 層構造を仮定した。逆解析に おける探索範囲は表 10 に示す通りで、地震基盤層の速度値以外は表 2 と同様である。得ら れた速度構造を図28に5地点分まとめて示す。また、それによって得られた速度構造モデ ルから算出される理論位相速度と観測位相速度を比較したものを図 29 に示す。Vs 値を 3.4 km/s で固定しているため、前項の位相速度比較の図よりも特に長周期側での理論値と観測 値の差異が大きいが全体的には概ね傾向について対応ができている。図 28 によれば、TKG と NGZ はほぼ同じモデルとなった。また、地震基盤層上面の深さは、CJB、HKT、TJN の順 に深くなり、それらの中間層の物性値もしくは層厚の違いが3地点間で現れた。これらの 結果では、層厚が非常に小さい部分がみられたことから、今後の数値モデルを考える際に は、CJBやHKTは3層モデルとして考えていくほうが適当であるといえる。第1層目の速 度値は、地点毎にややばらつきが大きいため、周期 0.2、0.3 秒程度以下の短周期部分の観 測位相速度の追加による工学的基盤層(Vs 0.6~0.8 km/s 層)の適切なモデル化も含め広帯 域での精査が今後必要であると考えられる。

表 10 地震基盤速度固定モデルにおける逆解析の探索範囲

				_			
-	Vs(km∕s)	Thickness(km)	ρ (g/cm³)	_	Vs(km/s)	Thickness(km)	$\rho \; (g/cm^3)$
	0.4-1.2	0.001-0.5	1.9		0.4-1.2	0.001-0.5	1.9
	3.4	_	2.5		0.8-2.4	0.001-1.0	2.0
-					2.0-3.0	0.001-1.0	2.3
					31	_	25



(d) 結論ならびに今後の課題

強震動予測に利用可能な既往の構造モデルについての調査を進めるとともに、 福岡平野における警固断層近傍の深部地盤構造モデル作成のための速度構造情 報を得るために、福岡市中心部とその周辺部で5地点、警固断層南東部延長上に 位置する筑紫平野北部の1地点にて微動アレイ探査を実施した。各地点で得られ た常時微動記録を用いて解析を行い、位相速度を算出し、各地点とも連続性の良 い位相速度の分散曲線が得られた。また、その観測位相速度をもとに地震基盤に 至る堆積層のS波速度構造が推定された。福岡地域は、既存の地下構造の物性値 情報が非常に少ないために、追加の微動アレイ探査に加え、本業務内の他の調査 結果をコンパイルした速度構造の妥当性の検証を行うことが今後の課題であり、 また、それらの結果をどのように3次元数値モデルの構築へ繋げていくかが重要 な課題になる。

(e) 引用文献

- Capon, J., High resolution frequency wavenumber spectrum analysis, Proc. IEEE, 57, 1408-1418, 1969.
- 福岡県, 地震に関する防災アセスメント調査報告書 (平成18年12月)、2006.
- 川瀬 博・長戸健一郎・中道 聡,ハイブリッド法強震動予測結果に基づいた福岡 市におけるシナリオ地震の被害予測,構造工学論文集,49B,7-16,2003.
- 木下 健・川瀬 博・早川 崇・佐藤智美,アレイ微動による九州大学周辺地域の 地盤構造の推定,日本建築学会九州支部研究報告,40,209-212,2001.
- 狐崎長琅・後藤典俊・小林芳正・井川 猛・堀家正則・斎藤徳美・黒田 徹・山根 一修・奥住宏一,地震動予測のための深層地盤P・S波速度の推定,自然災害 科学, 9-3, 1-17, 1998.
- 森川信之・先名重樹・早川 譲・藤原広行, 警固断層帯(南東部)の地震を想定 した地震動予測地図,地球惑星科学連合 2008 年大会予稿集, S146-P021, 2008.
- 岡田 広, 微動利用の地下構造推定方法, 物理探査学会(編), 物理探査ハンドブ ック, 203-211, 1998.
- 山田伸之・山中浩明・元木健太郎,福岡市中央区天神地区の表層地盤のS波速度 構造,地震2,69,109-120,2009.
- 山中浩明・武村雅之・石田 寛・池浦友則・野沢 貴・佐々木 透・丹羽正徳, 首 都圏西部におけるやや長周期微動アレイ観測と S 波速度構造の推定, 地震 2, 47, 163-172, 1994.
- 山中浩明・石田 寛,遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析,日本建築学 会構造系論文集,No. 468, 9-17, 1995.

3. 4-2 地下構造モデルの検証と強震動予測・被害予測

(1)業務の内容

(a) 業務題目 地下構造モデルの検証と強震動予測・被害予測

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人京都大学防災研究所	教授	川瀬博
国立大学法人京都大学防災研究所	准教授	松島 信一

(c) 業務の目的

本業務で得られた情報を反映して警固断層帯周辺の三次元地盤構造モデル を作成し、中小地震観測波形をターゲットに検証し、警固断層帯において地震 が発生した際の広周期帯域の強震動予測を行うとともに、予測された地震動に 対して動的非線形応答解析による構造物の被害予測を実施し、その社会的イン パクトを明らかにする。

(d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成 23 年度:

2005 年福岡県西方沖地震の発生後に観測された中小地震観測波形、各種の公開情報 および既往文献情報を収集した。三次元地盤構造情報について、地震調査研究推進本部 が J-SHIS サイトを通して配布している深部地下構造モデルおよび表層地盤種別情報、 および既往の調査研究結果を収集してそれを元に三次元地盤構造(V1)を作成し、中 小地震の強震動シミュレーションを行った。

福岡平野内において短期微動観測を実施するとともに、長期微動観測点を試験的に 設置し、観測を開始した。

2) 平成 24 年度:

平成23年度敷設の観測点に対して情報の少ない地域を中心にさらに観測点を追加し、 長期微動観測を継続する。また長期微動観測点を補間する形で、福岡平野内において短 期微動観測を行う。

長期微動観測および短期微動観測にて得られた記録からサイト増幅特性および水平 上下比を得る。これをターゲットにして地震波干渉法の理論に基づき一次元波動場のイ ンバージョン解析により基盤より上の堆積層部分の速度構造モデルを求め、地下構造高 度化のための参照情報として分担テーマ4-1のチームに渡す。

サブテーマ2の情報、分担テーマ4-1の速度構造、本分担テーマで得た速度情報 などの新規情報を参照して作成される三次元地盤構造(V2)を分担テーマ4-1から 受けとり、中小地震波形をターゲットにしてその妥当性を検証する。その結果から改良 の必要な地域を特定し修正を施して三次元地盤構造(V3)を構築する。

3) 平成 25 年度:

三次元地盤構造(V3)とサブテーマ1・3から得られる情報を参照して、強震動予 測レシピによる標準的震源モデルに基づいて広周期帯域の強震動予測を行い、その地動 最大値の分布を明らかにするとともに、その予測強震動に対して分担者らが開発してき た動的非線形応答解析による構造物の構造種別ごとの被害予測を実施して、その社会的 インパクトを明らかにする。

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 業務の要約

本サブサブテーマでは、強震動予測の高度化のため、平成年度は福岡県震度情報ネットワーク、K-NET/KiK-net、気象庁震度計ネット等の強震観測網による中小地震観測波形を収集したとともに、地震調査研究推進本部がJ-SHISサイトを通して配布している深部地下構造モデルおよび表層地盤種別情報、および既往の調査研究結果を元に三次元地 盤構造(V1)を作成し、強震動シミュレーションを実施してその妥当性と問題点を確認した。また、平成24年度以降に実施する地下構造モデルの検証のため、長期微動観測点を福岡平野内に試験的に設置し、地震波干渉法を用いて増幅特性および水平上下比を得ることができることを確認した。

(b) 業務の実施方法

2005 年福岡県西方沖地震の発生後に観測された中小地震観測波形については K-NET/KiK-net および気象庁震度計ネットの地震動波形については当該公開サイトおよ び公開情報担当機関から情報を入手した。福岡県震度情報ネットワークの地震波形につ いては福岡県と九州大学の協定に基づき入手されている記録情報を収集整理した。

地盤および地震動増幅特性に関する各種の公開情報および既往文献情報については 検索をかけて必要な文献を収集した。

三次元地盤構造情報については、地震調査研究推進本部が J-SHIS サイトを通して配 布している深部地下構造モデルおよび表層地盤種別情報、および既往の調査研究結果を 収集した。それらの情報を元に三次元地盤構造(V1)を作成し、選定した福岡県西方 沖地震の余震の強震動シミュレーションを実施した。

さらに、警固断層を挟んだ福岡平野内の複数地点において短期微動観測を行った。この短期微動観測の結果に基づいて観測点位置を決め、長期微動観測点を試験的に設置し、 観測を開始した。

(c) 業務の成果

1) 地震波形の収集

防災科学技術研究所が公開している K-NET および KiK-net、気象庁が管理し気象協会 を通して公開している震度計ネットによる中小地震観測波形を収集した。表1には福岡 市内の K-NET 観測点である FK0006(天神)において 2005 年福岡県西方沖地震以降に観測 された主な地震のリストを示す。ここで PGA はベクトル合成した最大加速度(Gal) で ある。なおその設置場所は後述の短期微動観測を実施した図11の地点 A であるので参 照されたい。図1・図2にはその本震、および今回の検証のターゲットとした 2005 年4 月 20 日の最大余震の強震記録(加速度波形)を示す。また福岡県が設置した震度情報ネットワークによる観測記録についても、福岡県と九州大学の協定に基づき入手されている記録情報を収集整理した。

	地雷改开口	記録開始時	雪山北法	雪山市奴	震源深	マグニチ	震央	PGA	
	地辰光生口	刻	辰大北祥	辰天鬼祀	さ	ュード	距離	PGA	
1	2005/3/20	10:53:48	33.74°	130.18°	9.0km	M7.0	26km	283.7	
2	2005/3/20	11:39:04	33.69°	130.26°	12.0km	M4.0	16km	18.0	
3	2005/3/20	11:50:14	33.73°	130.20°	18.0km	M4.2	24km	12.9	
4	2005/3/20	20:08:35	33.80°	130.10°	13.0km	M4.4	35km	27.2	
5	2005/3/20	20:38:22	33.74°	130.17°	11.0km	M4.5	27km	28.6	
6	2005/3/24	23:38:53	33.74°	130.17°	11.0km	M4.3	26km	19.1	
7	2005/4/1	21:52:18	33.67°	130.32°	12.0km	M4.3	11km	59.7	
8	2005/4/10	20:34:44	33.67°	130.28°	5.0km	M5.0	13km	23.4	
9	2005/4/20	6:11:31	33.66°	130.29°	14.0km	M5.8	14km	249.9	
10	2005/4/20	6:22:54	33.68°	130.29°	13.0km	M4.7	14km	19.4	
11	2005/4/20	6:44:56	33.68°	130.29°	12.0km	M4.5	13km	3.4	
12	2005/4/20	9:09:47	33.68°	130.28°	13.0km	M5.1	14km	73.4	
13	2005/7/5	5:10:13	33.74°	130.12°	15.0km	M4.2	30km	12.7	

表1 K-NET 天神 FK0006 で観測されている主な地震・地震動緒元









2) 地盤および地震動情報に関する文献の収集

今後の円滑な業務遂行のため、地盤および地震動増幅特性に関する各種の公開情報お よび既往文献情報を収集した。

まず地盤情報に関しては福岡市地盤図作成グループ(1981)が作成した福岡地盤図が

かつてより活用されてきており、中道・川瀬(2002)ではその情報を浅部の構造に利用している。図3にはその表層地盤の厚さを町丁目別に色分けして示す。なお白丸は福岡市役所の位置を表している。



図3 福岡県地盤図から求めた工学的基盤までの深さ分布(中道・川瀨, 2002)

中道・川瀬(2002)はまたアレー微動と重力探査の結果、および地質図に基づいて深い 地盤構造を推定して強震動予測に用いている。図4にはその地震基盤コンターを示す。 その後森・他(2007)は新たに実施したアレー微動結果と九州大学が実施した精密重力探 査結果を反映させた深部地盤構造を提案している。山田・他(2009)もアレー微動により 福岡市内の何地点かで地下構造を推定しており、参考になる。

活断層と地盤構造の関わりに関しては、上述の福岡地盤図(1981)を用いて警固断層の 位置を推定した鬼木(1996)の結果や浅層反射探査の結果を報告している加藤・他(2006) が参考になるが、最近では渋谷・他(2009)が単点微動の水平上下比の観測結果に基づい て断層位置を高精度に推定する試みを行っており、本業務での活用が望まれる。

地震動の評価や強震動予測に関しては、想定警固断層地震に関して、上述の中道・川瀬 (2002)のハイブリッド法の予測結果の前に、伊藤・川瀬(2001)による経験的グリーン関数 法による予測がある。また川瀬・他(2003)は中道・川瀬(2002)のシミュレーション波形を 用いて非線形応答解析により建物の被害率を求めており、断層からの距離と表層地質の影 響を反映した被害率予測を求めている。図5にはその結果のうちシナリオ1の予測結果を 示す。これらの予測が出された後、2005年に福岡県西方沖地震が発生し福岡市内でも数地 点で加速度波形が得られた。一方、建物被害分布は、全体としてはそれほど重大なレベル



図4 アレー微動と重力異常から求めた地震基盤までの深さ分布(中道・川瀬, 2002)



図5 予測地震動から求めた建物種別ごとの予想被害率分布(川瀬・他,2003) ではなかったが、天神凹地に集中する結果となり、その原因についての研究成果がいくつ



図6 福岡県地盤図による表層構造の増幅を考慮し、逆算した工学的基盤波から求めた 最大速度分布(佐藤・川瀬, 2006)

か報告されている。例えば佐藤・川瀬(2006)は K-NET 天神(FK0006)の観測波形から工学的 基盤への入射波を逆算し、それに各地点での一次元地盤増幅を考慮して最大速度コンター を求めた(図6)。その結果確かに天神凹地で最大速度が大きくなっていたものと推定され た。また、元木・他(2006)は同様に警固断層沿いの増幅効果について、余震観測データを 用いて明らかにしている。

また川瀬・他(2006)では観測強震動波形を用いて特性化震源モデルの震源すべり速度関数 を求めており、予測に際して参考になる。

3) 三次元地盤構造と強震動シミュレーション

地震調査研究推進本部が J-SHIS サイトを通して配布している深部地下構造モデルお よび表層地盤種別情報、および既往の調査研究結果を収集した。

図7には J-SHIS サイトに載せられている福岡地域の地下構造(各層上面の深さコン ター)を示す。この図から福岡市内の盆地の層厚は非常に薄く、風化層の厚さで見ても 部分的に1kmに達している場所があるのに留まり、全体として非常に硬質であるという 結果となっている。

図8には濱田・川瀬(2008)が 10,000 本以上のボーリングデータから求めた福岡市内 の工学的基盤の深度コンターを示す。このデータは図3に示した福岡地盤図の深度コン ターを高精度化したものと言え、データの密度が少ない郊外地区はともかく、データの 多い市街地では高い信頼性を有していると考えられる。本業務では次年度以降の解析で は表層の影響も三次元有限差分法の計算に取り入れるように、この構造を層厚コンター に転換して J-SHIS の深部速度構造に埋め込むことを考えたい。今回は時間の関係でこ の構造は三次元地盤構造モデルには反映されていない。



図8 ボーリングデータから求めた工学的基盤までの深さ分布(濱田・川瀬, 2008)

ここでは、上記 J-SHIS の情報を元に三次元地盤構造(V1)を作成し、比較対象とし て選定した福岡県西方沖地震の最大余震 M5.9 の強震動シミュレーションを実施した。 図9には参考とした震源モデルを示す(Asano and Iwata, 2006)。今回の解析ではこの 図の発震点に点震源を置き、その震源時間関数を KiK-net 宇美の硬質地盤上の観測記録 でデコンボリューションして地盤の影響を見た。なお解析の際の最表層の S 波速度は 600m/s、差分格子は 100m メッシュとしている。

図 10 には FK0006 地点および福岡市南消防署地点での観測波形とシミュレーション波 形との比較結果を示す。主要パルスの振幅・周期・出現時間は概ね再現されていること がわかる。なおシミュレーション波形で観測記録には見られない主要動の前に小振幅の 波群が見られるのはコンボリューションを 0.05Hz~1.0Hz の狭い周波数帯域で実施して いるためと考えられる。



図 9 Asano and Iwata (2006)の求めた最大余震の震源すべり量分布



図 10 FK0006 観測点における最大余震の観測記録と計算結果の比較

4) 短期微動観測

短期の単点微動観測では、第一義的に警固断層を挟んだ直線状の側線で断層による表 層構造の影響が水平上下比に現われることを確認するために3側線を選定し、さらに地 震動と微動の特性がどのように異なっているか、あるいは類似しているかを確認するた めに地震動観測点でも微動観測を実施した。

まず図 11 には測線1として地下鉄赤坂駅周辺を横断するように配置した直線アレーの配置図を示す。図 12 にはその結果として得られた微動記録の水平上下比のピーク振動数の分布を東側の測点Aから西側の測点Fまで並べた結果を示す。図から測点Dと測点Eの間にピーク振動数の変化があり、想定される警固断層位置(図 11 の赤破線)と対応していることがわかる。

図 13 には測線2として、長浜地区の浜の町公園を中心として配置した短直線アレーの配置図を示す。図 14 には得られた微動記録の水平上下比のピーク振動数分布を東側の測点Aから西側の測点Fまで並べた結果を示す。測線1と同様に測点Cと測点Dの間に 2.2Hz から 5Hz へのピーク振動数の大きな変化があり、想定される警固断層位置(図 13 の赤破線)とよく対応していることがわかる。

図 15 には測線3として高宮駅南側で警固断層を横断する位置に配置した直線アレーの配置図を示す。図 16 には得られた微動記録の水平上下比のピーク振動数分布を東側の測点Aから西側の測点Fまで並べた結果を示す。測点Dと測点Eの間に2.5Hz 近傍から7Hz 以上へのピーク振動数の大きな変化があり、想定される警固断層位置(図 15 の赤破線)とよく対応していることがわかる。ただし、測点 E と測点 F の水平上下比のピーク振幅はいずれも2以下であり、従ってこれらの観測点における表層地盤がほとんど存在せず硬質な基盤が浅いところまで来ていることを明確に示唆してはいるものの、単純にピーク振動数だけからは判断し難いことが指摘される。図 17 には一例として測点 E における NS 方向のある時間区間の水平上下比を示しておく。



図 11 短期微動観測点―測線1の観測地点(赤破線は推定断層位置)





図 14 測線2の水平上下比のピーク振動数



図 15 短期微動観測点―測線3の観測地点(赤破線は推定断層位置)



図 16 測線 3 の水平上下比のピーク振動数 146



図 17 測線 3 の測点 E の NS-上下比の周波数特性

5) 試験的長期微動観測

前述の短期微動観測の結果の水平・上下スペクトル比の卓越振動数から想定される警 固断層帯の位置を挟み、短期微動観測の側線1に対応するように北東の堆積層側に3地 点、南西の岩盤側に2地点を設置した。図18に観測点位置を示す。また観測点の諸元 を表2に示す。写真1~写真5に、各観測点の設置位置の外観および内観を示す。

設置した地震計は aLab 製 ITK 強震計 AK-002KGB1 (センサは K-NET 9 5型加速度計) で、時刻校正は GPS で行い、データサンプリングは 100Hz としている。



図 18 長期微動観測点位置地点

設置地点名	設置場所	緯度経度	設置日
福岡市民会館	受水槽内	33.598751N,	2/28
		130.398715E	
大名・舞鶴小学校	プレハブ校舎1F印刷室内	33.588946N,	2/27
		130. 394871E	
少年科学文化会館	受水槽内	33.592150N,	3/2
		130. 390267E	
警固中学校	防火水槽内	33.585185N,	2/27
		130. 387345E	
舞鶴中学校	南棟玄関	33.586514N,	2/27
		130.380557E	

表2 長期微動観測点の諸元



写真1 福岡市民会館観測点 (受水槽内)



写真2 大名小学校・舞鶴小学校観測点 (プレハブ校舎1F印刷室内)





写真3 少年科学文化会館観測点 (受水槽内)



写真4 警固中学校観測点 (防火水槽内)





写真5 舞鶴中学校観測点 (南棟玄関)

(d) 結論ならびに今後の課題

次年度以降の検討に必要な地震動、地盤情報を収集した。それらを元に第一次の三次元地盤構造(V1)を作成し、選定した福岡県西方沖地震の余震の強 震動シミュレーションを実施し、それらが概ね妥当なものであることを確認し た。また短期微動観測および長期微動観測点を福岡平野内に設置し、そのデー タを分析して、各地点のスペクトル特性および水平上下比を得ることができる こと、それは地震波干渉法により一次元地下構造を求めるのに有効であること を確認した。

今後、長期微動観測点の観測データから直下の速度構造を同定し、他の情報 と合わせて三次元地盤構造をバージョンアップする予定であるが、その際に盆 地に関して同一の基準速度構造を決める必要があり、その策定を早急に実施し ていく必要がある。 (e) 引用文献

Asano, K. and T. Iwata, Source process and near-source ground motions of the 2005 West off Fukuoka Prefecture earthquake, Earth Planets Space, 58, 93-98, 2006. 福岡市地盤図作成グループ:福岡地盤図,九州地質調査業協会, 1981.

- 濱田俊介,川瀬博:警固断層の地震による福岡市の地震動予測,日本建築学会学術講演 梗概集.B-2,構造 II,995~996,2008.
- 伊藤茂郎,川瀬博:統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証と仮想福岡地震への適用,日本建築学会構造系論文集,540,57~64,2001.
- 加野直巳, 稲崎富士, 山口和雄, 田中明子: 警固断層南東部での極浅層反射法調査, 活断層・古地震研究報告, 6, 143~152, 2006.
- 川瀬博,長戸健一郎,中道聡:ハイブリッド法強震動予測結果に基づいた福岡市におけるシナリオ地震の被害予測,構造工学論文集, Vol. 49B, 7~16, 2003.3.
- 川瀬博, 佐藤智美, 包 那仁満都拉, 梅田尚子: 2005 年福岡県西方沖地震: 強震動とその構造物破壊能および推定理論震源モデル, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, Paper No. 0014, 2006.11.
- 森重信,川瀬博,梅田尚子:福岡市域の深部地下構造の推定とその強震動予測への適用, 日本建築学会学術講演梗概集. B-2,構造 II, 421~422, 2007.
- 元木健太郎,山中浩明,瀬尾和大,川瀬博:2005 年福岡県西方沖の地震の余震観測に基 づく警固断層周辺の不整形地盤による地盤増幅特性の評価,日本建築学会構造系論 文集,602,129~136,2006.
- 中道聡,川瀬博:福岡市における三次元地下構造を考慮したハイブリッド法による広周 期帯域強震動予測,日本建築学会構造系論文集,560,83~91,2002.
- 鬼木史子:福岡市域の警固断層の詳細位置と地下形態,活断層研究,15,37~47,1996. 佐藤智美,川瀬博:経験的グリーン関数法に基づく 2005 年福岡県西方沖地震の特性化 震源モデルの推定,第12回日本地震工学シンポジウム, Paper No.0016, 2006.
- 澁谷龍典,川瀬博,清家規:微動観測による H/V スペクトルを用いた伏在断層の推定に 関する研究: 警固断層を例として,日本建築学会学術講演梗概集. B-2,構造 II,77 ~78, 2009.
- 山田伸之,山中浩明,元木健太郎:福岡市中央区天神地区の表層地盤の S 波速度構造, 地震,2輯,62,109~120,2009.