

図2 余震観測記録の例、表2に示すA地震とB地震のNS成分とUD成分の速度波形

### 3. 常時微動測定に基づく地盤震動特性

#### 3.1 常時微動測定の概要

余震観測点および図4に示す警固断層近傍の3つの測線で常時微動を測定した。3測線の微動は警固断層の位置を同定することを目的としている。N-測線は福岡市中央区の震度計と、M-測線は余震観測点と、S-測線は被害の大きかった街区と警固断層の位置関係を調べるために、各測線で、微動測定点を約50m間隔で配置した。

常時微動測定にはAkashi製の加速度計GPL-6A3Pを用いた。各観測点5分以上の常時微動を測定した。常時微動の解析にはノイズと判断した振幅の大きい部分を取り除いた定常的な波形のみを用いる。切り出した波形から20.48秒間に分割した3セグメント以上のデータをフーリエ変換し、平均したスペクトルによって評価を行う。平滑化には対数型ウィンドウを用い、振動源特性を除去するためにH/Vスペクトル比(以降、H/V)で検討した。

#### 3.2 常時微動測定に基づく段差構造の同定

図5に、常時微動のH/Vを測線ごとに並べたものを示す。太いグレーの破線はH/Vピーク周期をなぞったものであり、ピーク周期の変化を表している。S01ではH/Vに2つの山が見られる。S01の水平動スペクトルで確認すると、H/Vにも現れている長い方のピークの形状が鋭い。既往の調査研究<sup>20)</sup>によると、そのような鋭いピークは近接した建物の固有周期による振動特性を表す。S01のH/Vに見られる長い方のピーク周期は建物の固有周期であると判断した。どの測線においても、H/Vピーク周期の推移が見取られ、3測線すべて同様に地下構造が変わっていく様子がうかがえる。M-測線では、M02から南西側の観測点でH/Vに明瞭なピークが見られなくなった。それは表層地盤が極めて薄くなったためと考えられる。M02とM03のH/Vのスペクトル形状からその地下構造が異なることが推測できる。本研究では、警固断層の地表面に現れる位置をM02とM03の間にあるものと考え、基盤深度<sup>21)</sup>に見られる段差に平行になるように警固断層の地表面位置を引き、図1に書き加えた。図6に読みとった常時微動のH/Vピーク周期と図1から読みとった基盤深度を合わ

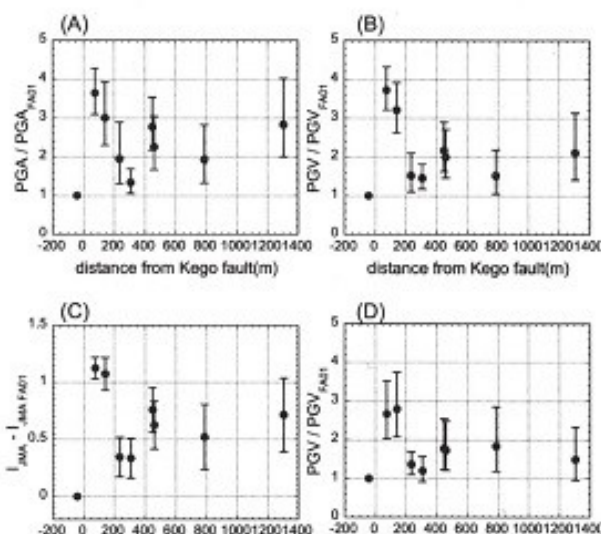


図3 基準点 (FA01) に対する最大水平加速度 (A)、最大水平速度 (B) の比、および計測震度差 (C) と最大上下速度比 (D) の分布

せて示す。3測線とも、ピーク周期の推移と、基盤深度の全体的な傾向は類似しており、常時微動特性は基盤よりも上部の地盤震動特性を表しているといえる。N測線では、常時微動のH/Vピーク周期によると、M測線や、S測線よりも複雑な基盤形状を表しているようにみえるが、図5のN05とN06のスペクトル形状は類似しており、N04からN07までの基盤面はほぼ平坦であると考えられる。S測線では、段差構造の位置に最も違いが見られるが、基盤深度図を作成する際に用いたボーリング資料がS測線付近にはなく、十分に補完しきれなかったことを示唆している。図6の基盤深度の横軸スケールは $V_s=300\text{m/s}$ としたときの4分の1波長剛から求められる周期の横軸スケールに相当しており、微動と深度にみられる平行しているずれを完新統の地層の影響と考えると、表層地盤のS波速度はおおよそ300m/s程度であると推定できる。

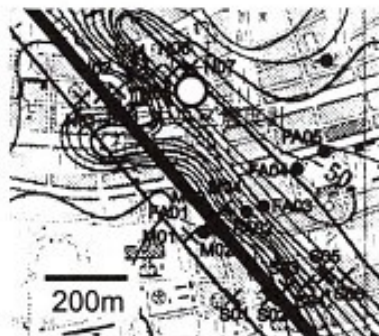


図4 微動測定点、文献9)に加筆

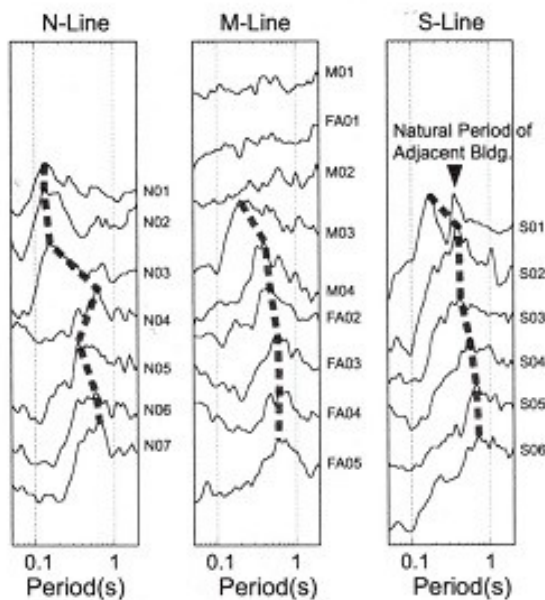


図5 3測線の常時微動 H/V スペクトル比の推移

### 3.3 常時微動と余震記録の震動特性の比較

余震記録を周波数領域に変換する際、観測波形から S 波到着時刻を目視で読みとり、直達 S 波から 10.24 秒間のデータをフーリエ変換する。震源から正接方向にあたる警固断層の直交方向成分に座標変換して、解析に用いた。スムージングには常時微動の解析と同様に、対数型ウィンドウを使用した。図7に余震観測点で測定した常時微動の H/V と余震記録の基準点 FA01 に対するスペクトル比の比較を示す。地下構造にコントラストが高い明瞭な境界面がある場合、H/V ピーク周期は観測地点の卓越周期にほぼ一致する<sup>19)</sup>、この周辺地域の常時微動は、図6でも確認したように、対象地域の常時微動は表層地盤の特性を反映している。FA04 から北東の観測点に関して、一次周期と H/V ピークの周期は良く対応している。しかし、FA02 と FA03 では、常時微動にみられるピーク周期よりも短周期が卓越しており、直下の地下構造以外の影響も含んでいることを示唆している。1次周期よりも短周期成分に関しては常時微動は落ち込んでおり、よく知られているように微動の H/V では高次モードについては説明できないことによる<sup>19)</sup>

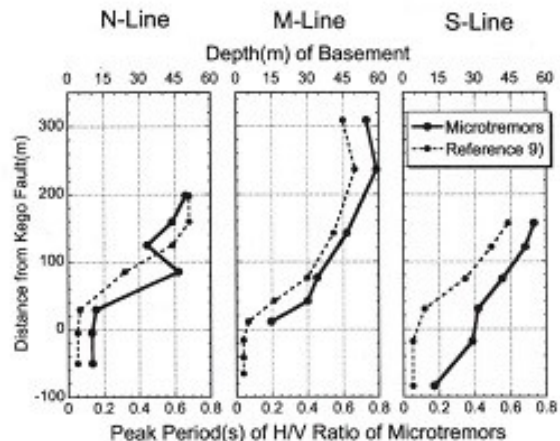


図6 H/V スペクトル比のピーク周期と第三紀基盤深度<sup>9)</sup>の比較

## 4. 地盤増幅特性と地下構造の関係

### 4.1 余震記録にみられる地盤増幅特性と地下構造の関係

余震記録に見られる地盤増幅特性を、理論的な増幅特性と比較するために、福同地盤図<sup>8)</sup>の基盤深度と沖積層底面深度さらに、FKO006 の PS 検層結果を参考にし、地下構造のモデル化を試みた。地下構造は各観測点で完新統、更新世、第三紀に相当する3層構造モデルを仮定した。完新統の地層の S 波速度は FKO006 の PS 検層の結果を参考にして平均的な 130m/s とした。洪積層の地層の S 波速度は FKO006 の検層結果 320m/s を参考にしながら、常時微動の H/V ピーク周期に合うように 300m/s とした。第三紀層の S 波速度はレイリー波の基本モードでピークが現れるような 800m/s とした。各観測点で構築した地下構造モデルを図8に示す。FKO006 での PS 検層結果では基盤深度は 20m 以上と評価され、図1に示す基盤深度<sup>8)</sup>とは整合しない。そこで、FKO006 の基盤深度は中道地<sup>19)</sup>が評価した 25m とした。この余震観測で最も堆積層が厚い観測点は FA04 である。そこから北東に向かうにしたがって徐々に基盤深度は浅くなるが、完新統の地層は厚くなっている。

図9にモデル化した地下構造モデルから S 波の一次元重複反射理論によって求められる伝達関数の FA01 に対する比と余震観測のスペクトル比の比較を示した。FA02、FA03 以外では、余震のスペクトル比は1次元の理論増幅特性と良く対応している。FA08 では多少、余震観測結果の方が周期が長く、モデル化した構造よりも実際の堆積層は厚いと考えられる。FA02 と FA03 では観測スペクトル比のピーク周期は理論値のピーク周期よりも短く、増幅特性は周期 0.3 秒から 1 秒の帯域全体で、理論値よりも大きく出ている。特に 0.2 秒から 0.5 秒までの周期帯域でその差が顕著になっている。1次元理論値よりも観測値が大きい要因として、表層地盤の不整形性の影響が考えられる。

### 4.2 2次元数値解析による増幅特性の評価

警固断層の不整形地盤の影響を考慮した地震動の挙動を理解するために、差分法による波動場の数値計算を行った。図10は、計算に用いた2次元モデルである。この表層地盤のモデルは、図8のモデルと同様に上記の地盤データ<sup>8)</sup>に基づいて、余震観測が行われた地域での警固断層に直交する方向の断面の表層地盤を示している。この地盤モデルに鉛直に入射する SH 波の地表面での応答を求めた。



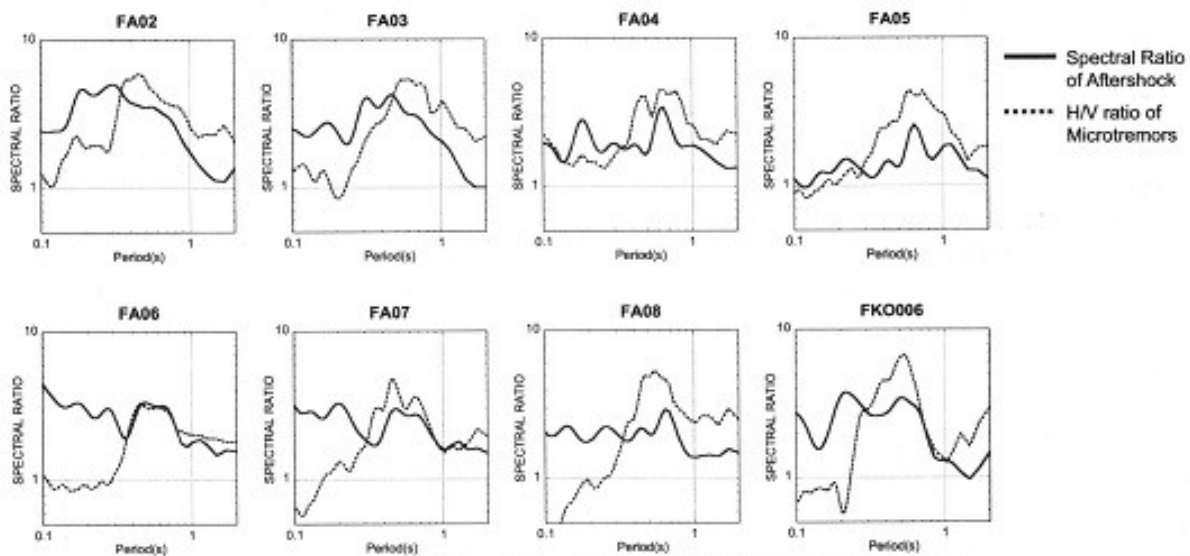


図7 FA01に対する余震スペクトルの平均と常時微動のH/Vスペクトル比の比較

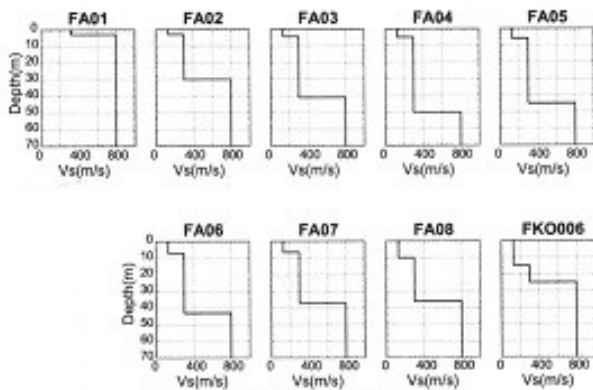


図8 余震観測点の地下構造モデル

図11は、計算波形の振幅比の分布を示している。上述の観測結果と比較するために、余震観測点と同じ位置での計算波形を求め、FA01に対応する地点との比を求めている。計算結果では、断層の影響で工学的基盤が傾斜している部分の約200mの範囲で振幅比が2.5倍となっている。この値は、大塚らによる3次元モデルでの計算結果とほぼ同程度の増幅を示しており、2次元モデルでも大きな間違いはないと考えられる。計算波形を示していないが、これは、直達S波と回折波の増幅的干渉によるものであり、兵庫県南部地震で指摘されたエッジ効果と同様のメカニズムによるものである。図には、観測された振幅比も示されており、定性的な傾向は一致しているが、観測振幅比がより大きくなっており、モデルの見直しは必要である。

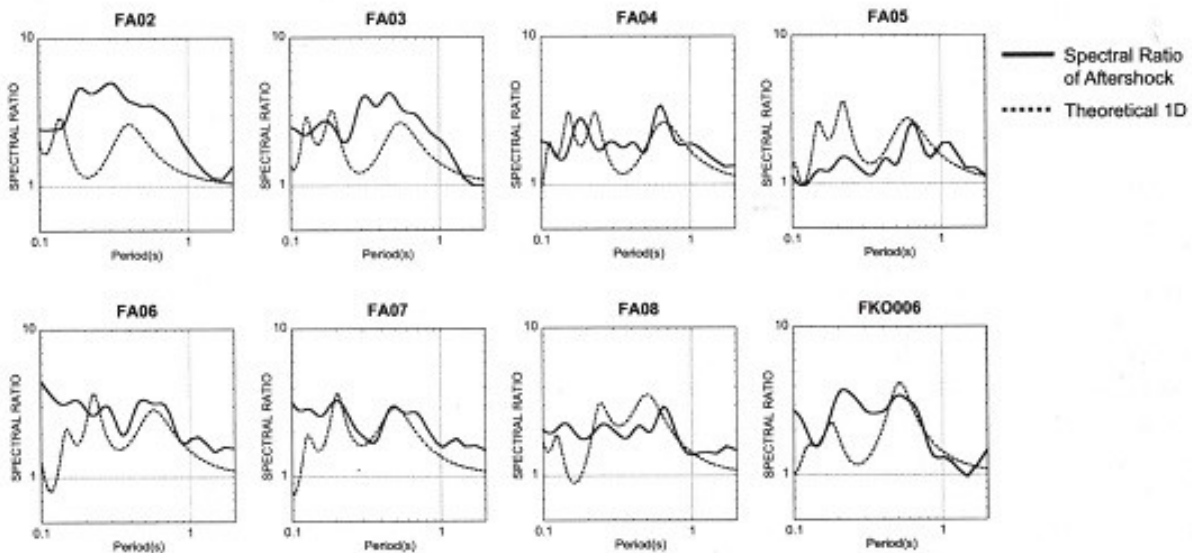


図9 FA01に対する余震スペクトル比と1次元S波の理論増幅特性の比の比較

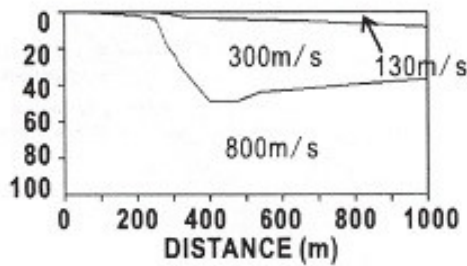


図10 警固断層に直交する2次元地下構造モデル

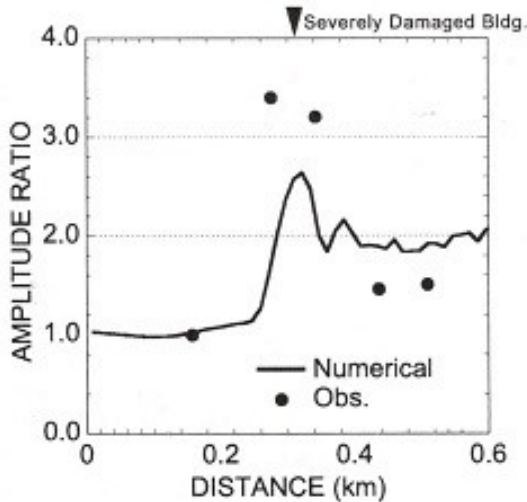


図11 2次元差分による地盤増幅特性と観測記録の比較

#### 4.3 波形にみられる不整形地盤の影響

波形で不整形地盤による効果が見られるかどうか確認するために、まず、速度波形の粒子軌跡を図12に示す。上の図は周期1-5秒のバンドパスフィルターをかけた速度の粒子軌跡で、下図は周期0.1-5秒のバンドパスフィルターを施したものである。上図によるとどの観測点も大体同じ方向を向いており、ほぼ断層直交方向成分を表している。しかし、短周期成分を含めた粒子軌跡では、FA03の軌跡は他の観測記録とは異なる方向性を示している。さらに、詳しく考察するために、S波到着から1秒ごとに分けた粒子軌跡を図13に示す。上半分にはFA03の波形と粒子軌跡を下には基準点のFA01のものを表す。波形は断層平行方向成分の速度波形を示し、それぞれの振幅で基準化している。粒子軌跡について、上がN320Eの方向を表し、つまり縦方向は断層平行方向成分を表し、それに直交する横方向は断層直交方向成分を表す。断層直交方向がS波が到達してから約1秒後に、断層平行方向に卓越していることが分かる。観測点直下から、S波が到来した後に偏向した地震波動が到来していることを示している。震源位置は観測点から断層平行方向に位置しているため、不整形な基盤面からの回折、もしくは傾斜する基盤面で重複反射した波動が遅れてきているものだと解釈できる。ほとんどの地震で、同様な傾向を示していることは確認できた。この現象は、伝播する波線が傾斜している基盤面で、震源と観測点を含む断面の面外へと曲げられたことが考えられ、それを理論的に説明するには3次元波動場の問題を解く必要がある。

#### 5. 不整形地盤の増幅効果と建築物被害との考察

筆者らも被害が集中している余震観測点周辺の被害を観察した。4階RC造建物に、1階ピロティ部分の柱が完全崩壊した大破と判断される被害<sup>14)</sup>が1棟見られ、その周辺に被害が集中していた。図11に大破した建物の位置を図5のS測線の微動結果を参考にして、警固断層からの距離を求め、プロットした。数値計算結果によると、もっとも地震動増幅が大きかった地点に位置しており、その周辺の被害が集中した地域と、図11で得られた振幅が大きかった狭いエ

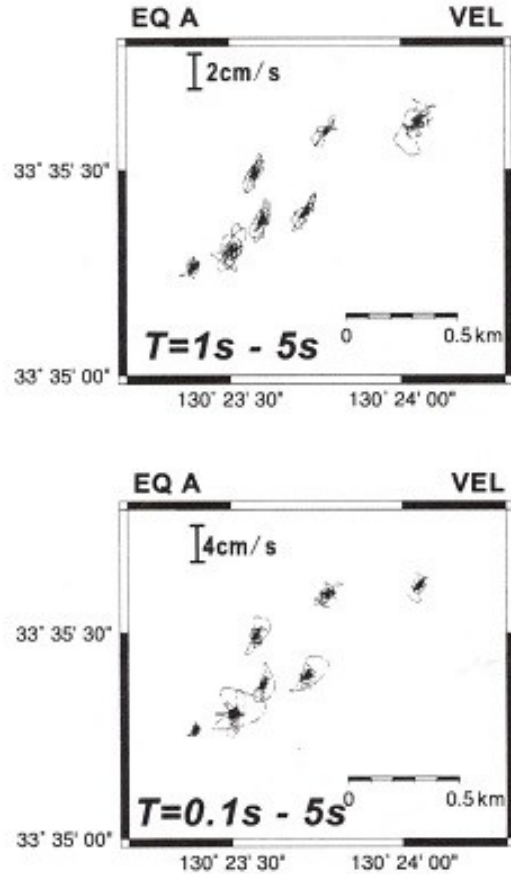


図12 速度成分の粒子軌跡の例、周期1-5成分(上図)と周期0.1-5秒の成分(下図)

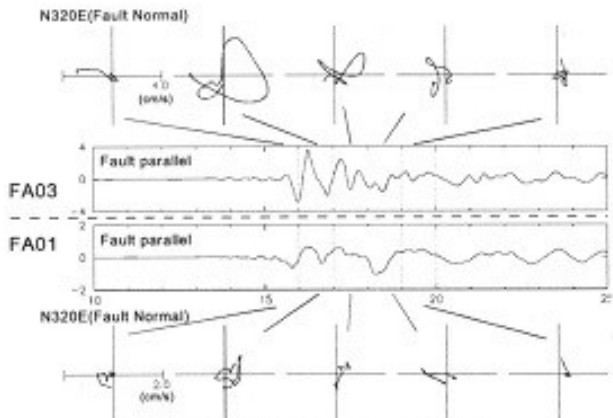


図13 速度成分の粒子軌跡の時刻歴変化

リアと対応している。大抵の建物が一棟だけみられたが、この地域に見られた被害は非構造部材である壁に亀裂が入った程度の軽微なものがほとんどであった。これは、表層地盤で増幅される周期は図9にも示すように1秒以下の帯域で、壊滅的な被害を与える周期1～2秒の帯域<sup>19)</sup>での増幅が、断層近傍においても小さいことによると考察できる。短周期の地震動増幅によって、加速度レベルで大きくなった地震動は、構造物を塑性化させても、塑性化後の構造物を崩壊させるような地震動強さではなかったと思われる。

## 6. まとめ

2005年福岡県西方沖の地震の際に警固断層沿いに集中してみられた建物被害の要因として入力地震動の分布特性を明らかにするために、同地域で余震観測を行った。警固断層に直交するように約700mの間に8観測点を配置し、余震記録と常時微動記録を用いて以下の結果が得られた。

- 1) 警固断層から200m程度までの限られた狭いエリアに、不整形地盤による地盤増幅効果が確認できた。表層地盤が薄い断層の南西側に比べて地震動強さが加速度、速度で、3倍程度、計測震度で1程度大きくなる。1秒以下の帯域全体でその増幅値はおおきくなるが、特に0.4秒以下の短周期帯域での増幅が1次元のS波の理論増幅と大きく異なる。
- 2) 警固断層から200m以上離れたところの地盤増幅特性は、おおよそ1次元のS波の理論増幅特性で説明することができる。
- 3) この地域での常時微動は、第四紀の表層地盤の特性を反映し、基盤面深度や段差構造の位置を同定することに有効である。
- 4) 局所的な増幅は表層地盤の2次元的不整形の影響で定性的には説明できる。
- 5) 断層近傍の観測点だけに断層平行方向に偏向したような成分が見られ、それはS波初動から約1秒後に現れる。
- 6) 得られた増幅効果と構造物被害には相関があることが認められたことから、建物被害が集中した一つの要因として、第三紀層基盤の上に存在する表層地盤のエッジ効果によるものであると考えられる。

以上、本研究の結果は今後の不整形地盤による地盤増幅特性を考慮した精度の良い地震動予測のために、観測事象として裏付けするものである。しかし、観測記録にみられた地震波動の偏向現象や上下動の増幅については、ここで計算しているモデルの適用範囲を超えており、2次元面内波動場や3次元波動場を考慮した数値解析による確認が必要であると思われる。

## 謝辞

余震観測に際して、福岡県西総合庁舎、福岡結核予防センター、中央区役所、大名小学校、大長寺、安国寺、大津たばこの方々には、ご協力を戴きました。常時微動測定や地震計の設置に際して、東京工業大学大学院生の上田遼氏と竹越美佳氏に協力して頂いた。また解析に際して、防災科学技術研究所K-NETの地震動データ、気象庁の震源情報を使用させて頂きました。本研究の一部は文部省科学研究費補助金(研究代表者:川瀬博、課題番号:17800001)により実施したものです。記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 瀬尾和夫: 2005年3月20日福岡県西方沖地震の被害について。震災予防, 2005, 印刷中。
- 2) 幸左賢二, 日野伸一, 松田泰治, 島野 清: 市街地における被害集中地域調査, 福岡県西方沖地震・土木学会被害調査団速報第2報, 土木学会, <http://www.jsoc.or.jp/report/34/body7.html>, 2005。
- 3) 大塚久吾: 福岡県西方沖地震調査速報, 土木学会誌, 2005, 90, No.5, 35-38。
- 4) 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, 2003, 49B, 7-16。
- 5) Kawase, H.: The cause of the damage belt in Kobe. "The basin edge effects". Constructive interference of the S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, 1996, Seism. Res. Lett., 67, 25-34。
- 6) 岡本拓夫, 西田良平, 野口竜也: 鳥取県西部地震(2000, M7.3)の時に認められた境港市の異常震域に関する一考察, 第27回土木学会地震工学論文集, 論文番号213, 2003
- 7) 山中常明, 栗田勝夫: 基盤の段差構造が地震動特性に及ぼす影響, 日本地震工学シンポジウム, 第1分冊, 949-952, 1998
- 8) 福岡市地盤図作成グループ: 福岡市地盤図, 九州地質調査業協会, 1981, 174 pp。
- 9) 紺野克明, 大町達夫: 常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適用した平滑化とその適用例, 土木学会論文集, No.525 / I-33, 247-259, 1995
- 10) 元木健太郎, 藤野志郎, 藤田安人, 高橋宏樹, 大久保康弘, 青藤元嗣, 坪田慎介: 常時微動に基づくアルメニア教会建築の振動特性と被災状況の考察, 2002年度日本建築学会関東支部研究報告集, 621-624, 2002
- 11) Kudo, K. (1995), Practical Estimates of Site Response State of Art Report, Proc. 5<sup>th</sup> International Conf. Seismic Zonation, 1878-1907
- 12) 時松孝次, 仲條有二, 田村修二: 短周期微動の水平鉛直振幅比と地盤特性の関係, 日本建築学会構造系論文集, 第457号, 11-18, 1994
- 13) 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, 第560号, 83-91, 2002
- 14) 日本建築防災協会, 震災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート造編), 日本建築防災協会, 1991
- 15) 境有紀, 朝岡一, 神野達夫: 建て門被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第555号, 85-91, 2002