

2．地震および地震動（大塚，古川）

2.1 地震の概要

2005年3月20日午前10時53分ごろ，九州北部でマグニチュード（M）7.0の強い地震があり，福岡市中央区・東区と福岡県前原市，佐賀県みやき町で震度6弱，福岡県久留米市や長崎県壱岐市などで震度5強を記録した．この地震は，下関の北西約70km付近の福岡県西方沖（北緯33.9度，東経130.2度，震源の深さは9km）を震源とする，北西－南東方向の長さ約30kmの左横ずれ断層であった．気象庁は20日10時57分に福岡県日本海沿岸，壱岐・対馬に「津波注意」の津波注意報を発表し，その後12時00分にこの津波注意報を解除した．断層が上下方向にずれた場合は海が上下に揺れるため津波の危険性が高いが，今回は横方向だったため，海域の浅い地震ではあったが津波は発生しなかった．

2.2 地震のメカニズム

(1)左横ずれ断層

福岡管区气象台によると，太平洋プレートとユーラシアプレートが日本海溝付近でぶつかり合うことによって発生したひずみが，約1000km離れた福岡県西方沖まで伝わり，今回の地震が発生したとされている（図-2.1）．南北方向に引っ張る力と東西方向から押す力が震源付近で働く左横ずれ断層で，北西から南東方向にかけて地盤がずれたとされている（図-2.2）．これまでに知られていない海底の断層がずれたことによる内陸直下型地震である．今回の地震の震源は，福岡市内を北西から南東に走る警固断層の延長線上にあり，警固断層も今回の地震と同じような力の働き方をしているが，今回の地震による力が，警固断層に与えた影響はほとんどないとしている．

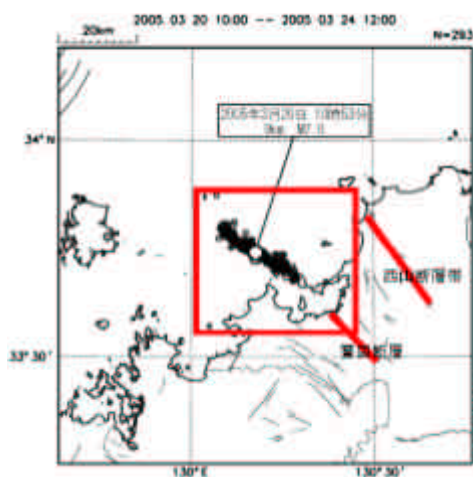


図-2.1 福岡県西方沖の震源（気象庁）

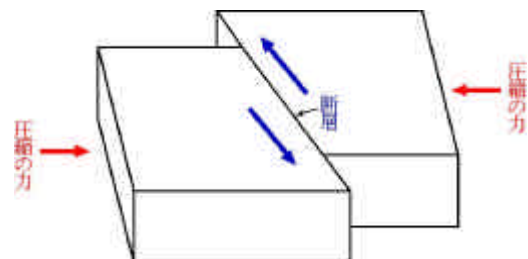


図-2.2 左横ずれ断層

(2)震源パラメータ

地震波形を用いた震源過程の解析が、複数の機関によって行われている。ここでは、表-2.1 に、東京大学地震研究所の山中により発表された震源パラメータを示す。他の機関からも震源パラメータが発表されているが、パラメータ値は概ね一致したものであった。

表-2.1 東大地震研究所の発表した震源パラメータ

走行角	傾斜角	深さ	すべり角	断層面積	食い違い量	地震モーメント	モーメント マグニ チュード (M_w)	破壊継続時間(主破壊)
302度	87度	12km	- 5度	15km × 15km	1.4m	$8.7 \times 10^{18} \text{Nm}$	6.6	8sec

(3)震度分布

震源周辺には、気象庁をはじめ、地方公共団体や文部科学技術庁防災科学技術研究所の K-net, Kik-net などによる地震計・震度計が数多く設定されており、地震発生後の早い段階で数多くの有用な情報を提供した。

気象庁発表の各地の震度階を、図 2-3 に示す。表 2-2 に、本震で震度 5 以上を計測した観測点について示す。表-2.2 には、被害の大きかった玄界島（福岡県西区）が入っていない。玄界島では建物が全半壊するなどの大きな被害が出たが、気象庁の推計震度分布では「震度 4」相当であった。この分布は、震度計がないところの揺れもいち早く推定して防災の初動に生かすための情報であるが、推定「震度 4」は実態と違いすぎるとして問題視されている。

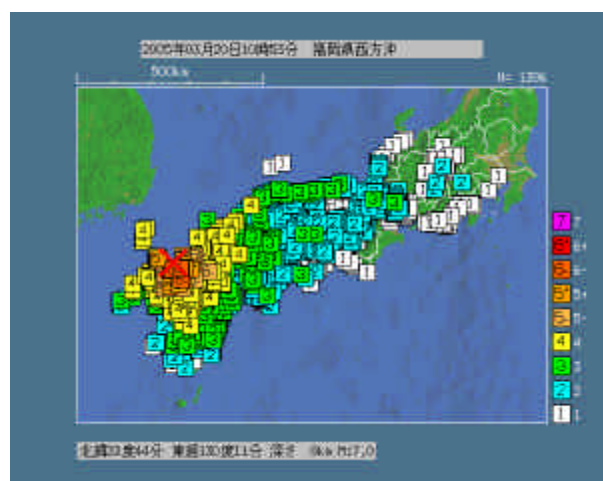


図-2.3 震度分布図（気象庁）

表-2.2 震度 5 以上を記録した観測点(気象庁による)

福岡県	震度 6 弱	福岡東区東浜* , 福岡中央区舞鶴* , 前原市前原西*
	震度 5 強	福岡中央区大濠 , 福岡西区今宿* , 福岡早良区百道浜* , 春日市原町* , 須恵町須恵* , 福岡新宮町緑ヶ浜* , 久山町久原* , 粕屋町仲原* , 二丈町深江* , 福岡志摩町初 , 碓井町上臼井* , 穂波町忠隈* , 久留米市津福本町 , 大川市酒見*
	震度 5 弱	福岡博多区博多駅前* , 福岡南区塩原* , 福岡城南区神松寺* , 大野城市曙町* , 宗像市東郷* , 宗像市江口* , 那珂川町西隈* , 宇美町宇美* , 篠栗町篠栗* , 志免町志免* , 福岡大島村役場* , 福津市津屋崎* , 北九州戸畑区千防* , 北九州八幡西区相生町* , 中間市中間* , 遠賀町今古賀* , 直方市新町* , 飯塚市川島 , 若宮町福丸* , 筑穂町長尾* , 久留米市北野町* , 久留米市城島町* , 柳川市本町* , 小郡市小郡* , 朝倉町宮野* , 大刀洗町富多* , 大木町八町牟田* , 高田町濃施* , うきは市浮羽町* , 筑前町下高場 , 筑前町篠隈*
佐賀県	震度 6 弱	みやき町北茂安*
	震度 5 弱	七山村滝川* , 上峰町坊所* , 白石町有明*
	震度 5 弱	唐津市西城内 , 唐津市北波多* , 唐津市呼子* , 鳥栖市宿町* , 多久市北多久町* , 諸富町諸富津* , 川副町鹿江* , 東与賀町下古賀* , 久保田町新田* , 佐賀大和町尼寺* , 佐賀神埼町神埼* , 佐賀千代田町直島* , 三田川町吉田* , 三瀬村三瀬* , 佐賀北方町志久* , 江北町山口* , 白石町福田* , 白石町福富* , 佐賀嬉野町役場* , みやき町中原* , 小城市三日月* , 小城市牛津* , 小城市芦刈*
長崎県	震度 5 強	壱岐市芦辺町芦辺*
	震度 5 弱	壱岐市石田町*
大分県	震度 5 弱	中津市三光*

(* は地方公共団体または防災科学技術研究所の震度観測点)

(4)余震活動

余震活動は、本震 - 余震型で推移している。気象庁によると、これまでに発生した最大余震は、22 日15 時55 分頃の余震であり、マグニチュードは5.4であった。この地震により玄界島（福岡市西区）、前原市、新宮町、志摩町で震度4 を記録した。震源は本震とほぼ同じ場所であり、本震と同様の横ずれ型断層によるものであった。3 月24 日14 時までに

発生した震度1以上の余震の回数は、震度4 が1 回、震度3 が11回、震度2 が61 回、震度1 が122 回の計195 回である。

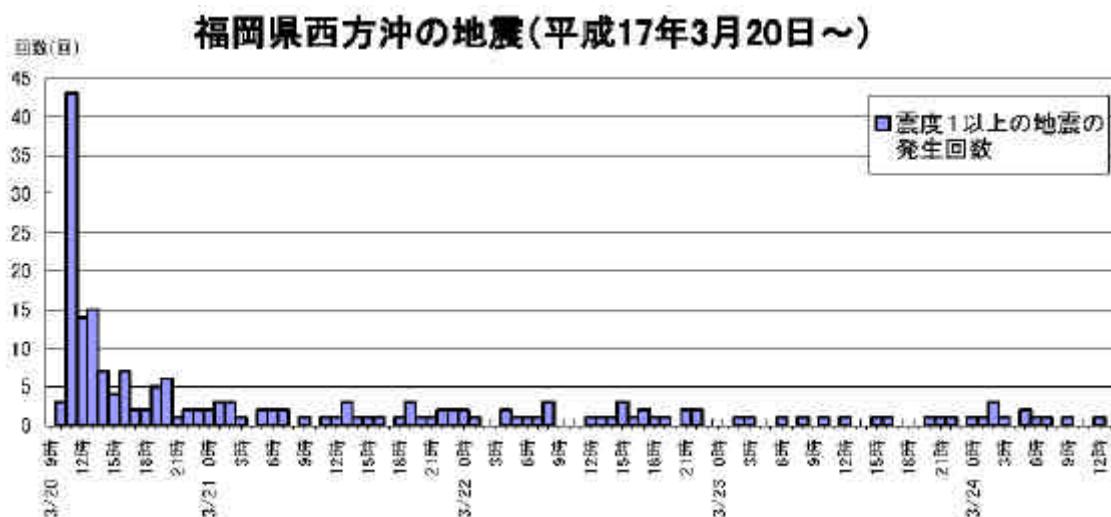


図-2.4 余震回数ヒストグラム（気象庁による）

2.3 地震動の特性

(1) 強震動記録の概要

今回の地震では、科学技術庁防災科学技術研究所により設置された強震計で、多数の強震記録が得られている。これらの記録は、Kyoshin Net (K-net) としてインターネット上で公開されており、本調査では K-net による情報を利用した。

まず図-2.5 に九州地方における K-net の強震計の設置地点位置を、表-2.3 に主な観測地点での最大加速度と計測震度を示す。表-2.3 は最大加速度の大きい順に並んでいる。なお、計測震度は気象庁の計測震度算定方式に基づいて防災科学技術研究所が計算した結果である。

表-2.3 によると、最も大きい最大加速度を示したのは、長崎県の平戸(NGS001)であり、東西方向に 355gal である。次いで、佐賀県の鎮西(SAG001)で東西方向に 329gal、佐賀県の唐津(SAG002)で南北方向に 316gal である。1995 年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された加速度波形の最大加速度 817.82gal と比較すると半分以下であり、兵庫県南部地震に比べて破壊力が小さいことがわかる。計測震度が最も大きいのは、福岡市中央区天神にある計測点・福岡 FKO006 であり、ここでの最大加速度は南北方向に 277gal となっている。最大加速度が 300gal 以上を計測したのは 3 地点であり、最大加速度 200gal 以上を記録したのは 9 地点、22 地点において 100gal 以上の最大加速度を記録した。

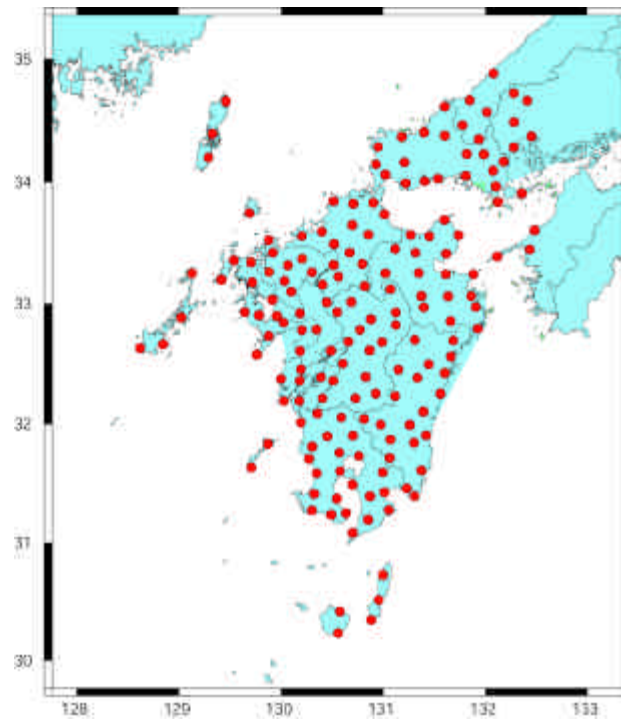


図-2.5 K-net 観測点

(2)主な強震動記録の波形

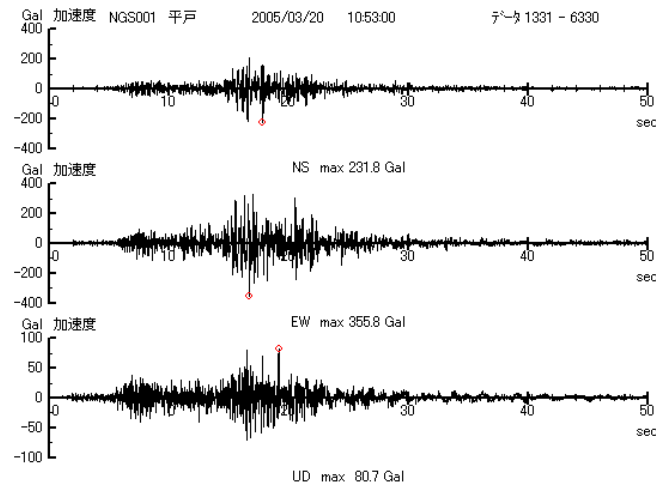
ここでは、表-2.2 に示した K-net の観測データのうち、最大加速度の大きい 2 つの観測記録（平戸 NGS001、福岡 FKO006）について、加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトル・速度応答スペクトル（減衰定数 5%）をそれぞれ示す（図-2.6、図-2.7）。

平戸 NGS001 の記録の加速度応答スペクトル（図-2.6(b)）では、加速度応答の最大値は、固有周期が約 0.2 秒の構造物が東西方向において最も大きく、約 1100gal をとることがわかる。加速度応答スペクトルの形状は 0.2 秒をピークにそれより長周期側では急な傾きで小さくなっており、固有周期が 1 秒の構造物の加速度応答の最大値は約 80gal となる。一方、福岡 FKO006 の記録の加速度応答スペクトル（図-2.6(b)）は、平戸 NGS001 に比べてピークを取る周期も、傾きが急に小さくなり始める周期も、長周期よりである。固有周期が約 0.6 秒の構造物が南北方向において最も大きく、約 900gal をとる。固有周期が 1 秒の構造物の加速度応答の最大値は約 500gal となる。

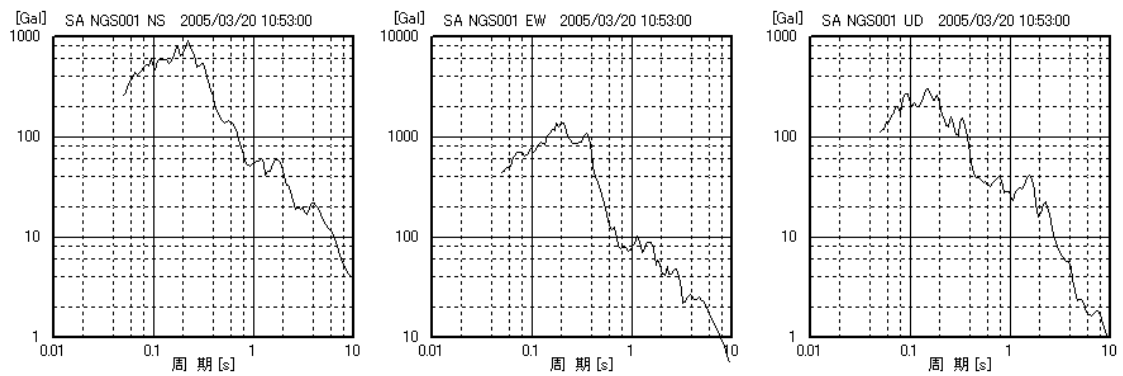
加速度応答スペクトルの最大値を比較すれば、平戸 NGS001 の方が福岡 FKO006 より大きい。固有周期が 0.5 秒～1 秒の構造物の加速度応答の最大値を比較すれば、福岡 FKO006 の方が明らかに大きく、今回の地震では、福岡 FKO006 の波形の方が構造物に与える影響がより大きかったことがわかる。

表-2.2 各観測点での最大加速度と計測震度

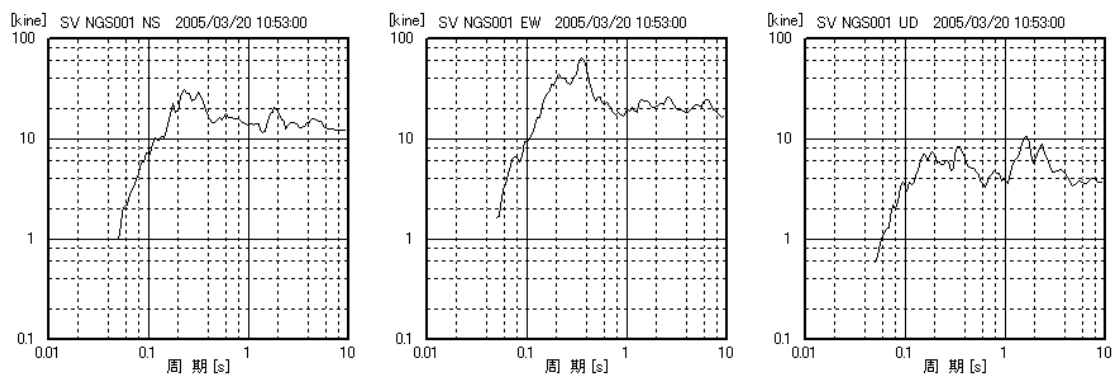
コード	観測点名	緯度	経度	最大加速度(ガル)			計測震度 (参考値)
		北緯	東経	N-S	E-W	U-D	
NGS001	平戸	33.358	129.541	232	356	81	5
SAG001	鎮西	33.524	129.879	118	330	97	4.5
SAG002	唐津	33.421	129.922	317	269	291	4.8
FKO006	福岡	33.594	130.401	277	239	138	5.5
FKO005	飯塚	33.649	130.699	265	175	87	4.7
FKO007	前原	33.558	130.205	196	261	174	5.1
FKO001	玄海	33.844	130.515	228	228	121	4.5
FKO004	行橋	33.736	131.012	214	114	102	4.4
NGS002	松浦	33.341	129.708	133	206	74	4.9
SAG003	富士	33.37	130.21	191	116	55	4.2
FKO015	柳川	33.159	130.407	118	179	64	4.9
FKO013	八女	33.222	130.563	179	170	50	4.6
OIT005	耶馬溪	33.452	131.117	160	112	36	3.6
SAG005	厳木	33.318	130.067	157	159	87	3.7
SAG007	佐賀	33.259	130.303	139	154	88	4.5
NGS023	郷ノ浦	33.747	129.692	142	106	153	4.2
FKO002	中間	33.823	130.708	94	129	80	4.5
SAG004	伊万里	33.261	129.884	85	123	46	4.2
FKO008	添田	33.568	130.856	120	122	70	4.3
FKO009	筑紫野	33.492	130.519	114	117	53	4.4
NGS021	豊玉	34.394	129.326	98	108	32	3.9
NGS022	国分	34.2	129.289	97	108	37	3.9
YMG006	豊浦	34.146	130.932	66	99	24	3.7
NGS003	志々伎	33.198	129.415	96	77	37	3.9
FKO010	甘木	33.42	130.671	77	95	31	3.9
OIT002	中津	33.565	131.27	70	92	41	4
KMM002	山鹿	33.015	130.687	51	86	37	4.1
OIT003	豊後高田	33.555	131.451	61	85	25	3.8
YMG011	下関	34.061	131.024	83	73	48	4.1
YMG013	防府	34.028	131.537	83	67	22	3.8
FKO016	大牟田	33.013	130.449	83	72	48	3.7
FKO003	北九州	33.829	130.904	76	73	53	3.8
NGS020	上対馬	34.658	129.462	64	74	30	3.5
YMG002	萩	34.404	131.401	48	68	24	4
KMM005	大津	32.873	130.88	50	68	24	3.7
NGS004	佐世保	33.178	129.72	68	50	32	3.5
SAG006	武雄	33.188	130.036	60	68	34	4.2
YMG001	須佐	34.614	131.604	61	48	22	3.9
SAG008	鹿島	33.1	130.102	48	59	23	3.9
KMM003	玉名	32.93	130.55	57	45	18	3.7
NGS010	長崎	32.732	129.879	43	55	19	3
NGS005	東彼杵	33.034	129.919	50	42	21	3.6



(a) 加速度時刻歴波形

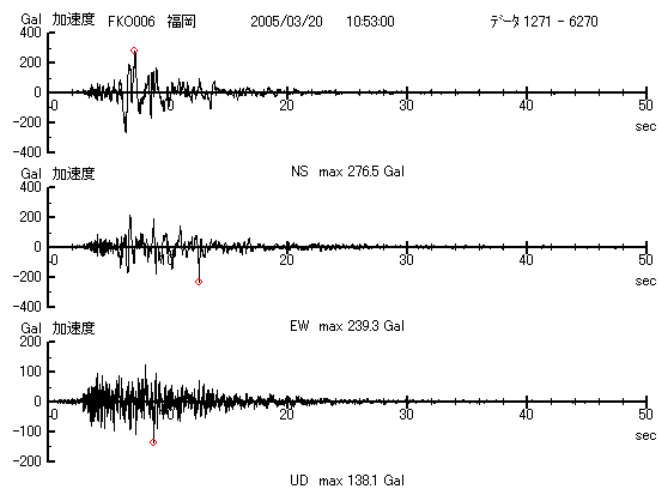


(b) 加速度応答スペクトル

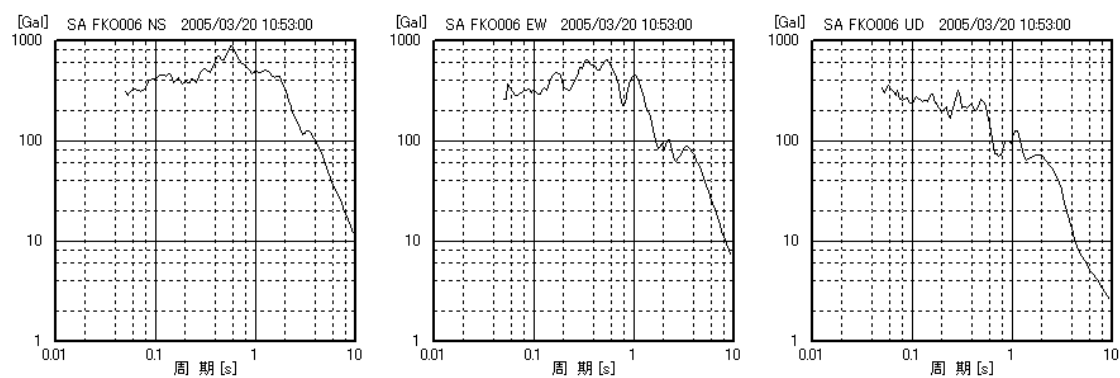


(c) 速度応答スペクトル

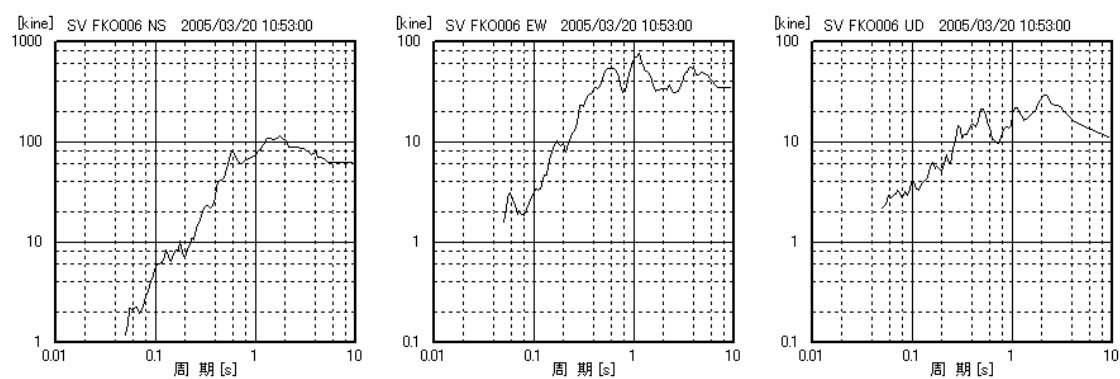
図 2.6 K-net 平戸 (NGS001) の観測記録



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル



(c) 速度応答スペクトル

図 2.6 K-net 福岡 (FKO006) の観測記録

2.4 福岡市中央区の市街地周辺の地盤構造

(1)被害集中地域について

表-2.2 に示した K-net の観測記録の最大加速度を比較すると、福岡市中央区天神にある計測点・福岡 FKO006 で最も大きい最大加速度を示し、南北方向に 277gal となっている。K-net 観測点・福岡 FKO006 のある天神付近の建物被害を調べたところ、構造物の本体に損傷が発生した被害件数は 0 件であり、被害を受けた建物はいずれも部分的な損傷に留まっていた。

これに対して、福岡市中央区大名にある免震オフィスビルの基礎上で観測された地震記録によれば、最大加速度は南北方向で 489gal となっている。大名など、警固断層近傍では、部分損傷のみならず本体部分が損傷した建物も多数あり、被害を受けた建物が集中しているエリアである。

この 2 観測点、すなわち K-net の観測点・福岡 FKO006 と免震オフィスビルとの距離は直線距離にしてわずか 1.3km であるにも関わらず、最大加速度に約 2 倍近の差が見られたこと、これに対応して建物被害においても本体部分に損傷を受けた被害件数に有意な差が認められたことは、特筆に価する。

(2) 被害集中地域と地盤特性との関連について

図-2.8 は、福岡市中央区の警固、薬院、今泉付近における想定地質断面図である。図-2.8 の右側が西側、左側が東側である。頁岩～砂岩～礫岩からなる層が基盤であり、北西 - 南東に走っている警固断層は、基盤の傾きが大きく変化するところに相当する。図-2.5 から明らかなように、断層の西側と東側で地層構造が大きく異なっている。断層の西側の基盤面は浅く、東側では基盤が深くなっており、東側には厚い堆積層が存在している。基盤が深い領域では地震動の増幅が生じて地表面において大きな加速度となること、不整形地盤によりひずみが生じて大きな加速度となることなどが、被害につながったと考えられる。最大加速度 489gal を記録した免震オフィスビルも、この不整形地盤上に位置している。被害はこの不整形地盤のところに集中しており、地盤特性が被害の差異に与えた影響が大きいと考えられる。

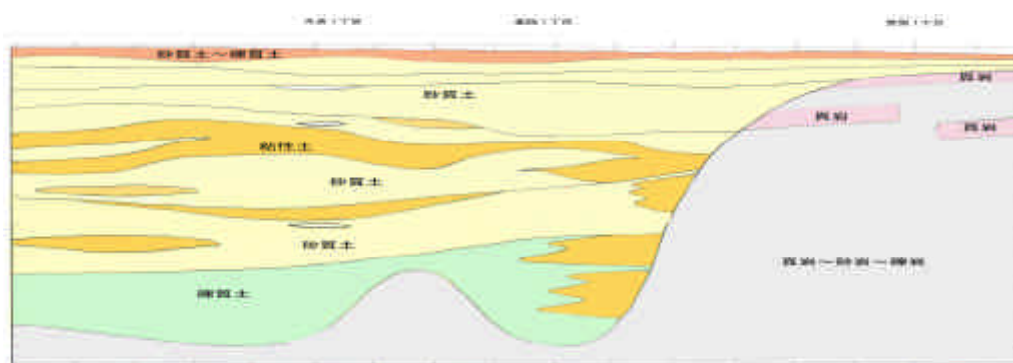


図-2.8 想定地質断面図

2.5 建物被害集中地域と不整形地盤の関連について

(1) 強震動記録と建物被害について

2.4 で述べたように，天神 5 丁目 1-23 に設置されている防災科学技術研究所の強震ネットワーク（K-NET）による観測結果（地表面地震動）の最大値は南北方向 277gal，東西方向 239gal であった．一方，大名 2 丁目 4-12 所在の（株）建設技術研究所九州支社（免震建物）の免震基礎部（地表面相当）の最大加速度は南北方向 489gal，東西方向 310gal であった．ちなみに同一地点での地下 - 65m における基盤内での最大加速度は南北方向 203gal，東西方向 124gal であった．同社の地表面地震動の観測波形の加速度応答スペクトル（減衰定数を 5% で試算）は 2000gal を越えている．図 2-9 に両地点の南北方向加速度応答スペクトルを比較している．建築物の被害の集中した地区において地表面加速度が他の地域と比べて大きいことは，これらの観測結果の比較から明らかであるが，この地震動の増幅の原因を数値解析によって検証してみた．

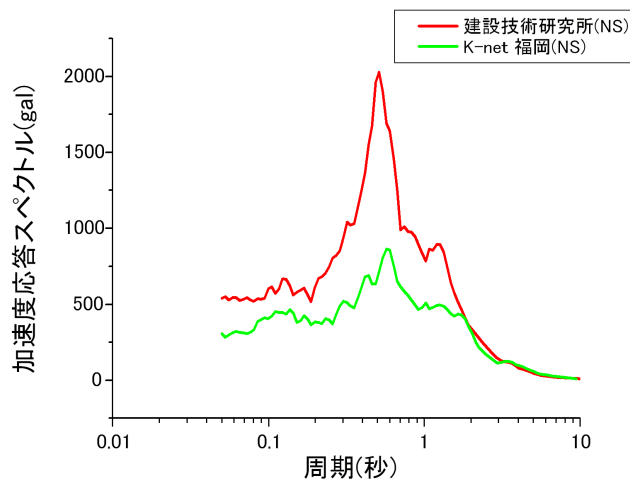


図 2-9 加速度応答スペクトルの比較

(2) 解析概要

不整形地盤においては，地震動の増幅や地盤内ひずみの増大が指摘されているが，既往文献¹⁾によると，福岡の基盤等高線は，大名・今泉地区で等高線が密となる傾斜地盤であり，ほぼ南西の方向から北東の方向に傾斜している地層構成となっている．この傾斜地盤は断層運動によって形成されたと言われており，断層線は正確には特定できないが，結果的に地下において，図 2-10 に示すような不整形地盤が形成されていることはボーリングデータから明らかである．この地区から，図 2-10 に併記するような長方形の地区を対象にして，3 次元有限要素法による線形時刻歴応答解析を実施した．

解析地盤の大きさは，長辺方向 1000m，短辺方向 400m，深さ方向 50m であり，対応するメッシュ数は $50 \times 10 \times 10$ である．解析モデルの方向については，図 2-10 の長辺方向（x 方向）が北東方向となるように設定した．地盤データについては，図 2-10 に示す箇所のボーリングデ

ータを用いて基盤上は成層地盤として作成した．地層構成，N値，地盤のせん断弾性係数の高さ方向分布を図2-11に示す．減衰は，1次と2次モードの減衰定数を10%とするレーリー減衰を採用した．境界条件については，モデルの底面は固定，側方は鉛直方向固定，水平方向自由としている．入力波は前述の建設技術研究所において観測された基盤波の3成分を使用し，3方向同時加振とした．工学的基盤の等高線図を参考にして、図2-12に示すような3次元の地盤モデルを作成し，上記の基盤波を入力して，当該地表面の加速度を計算した．（注：図2-10のモデルのコーナー部のアルファベットA～Dと図2-12のアルファベットが対応している．）

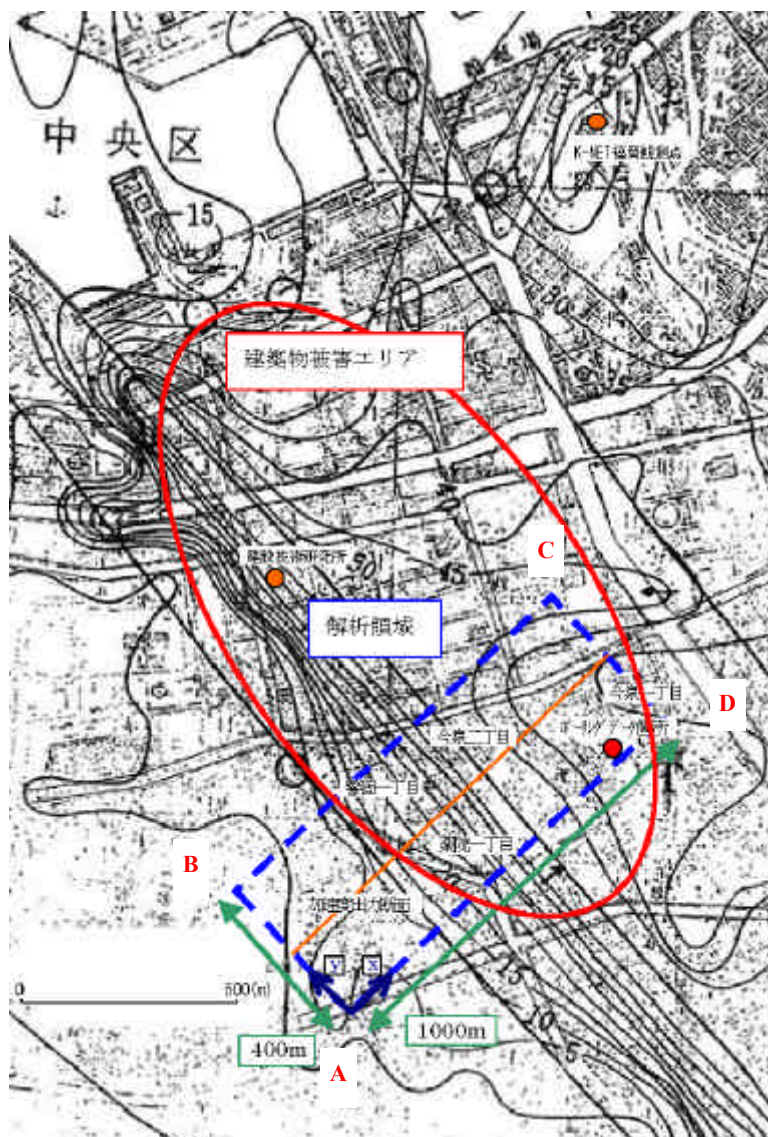


図 2-10 基盤等高線図と解析領域

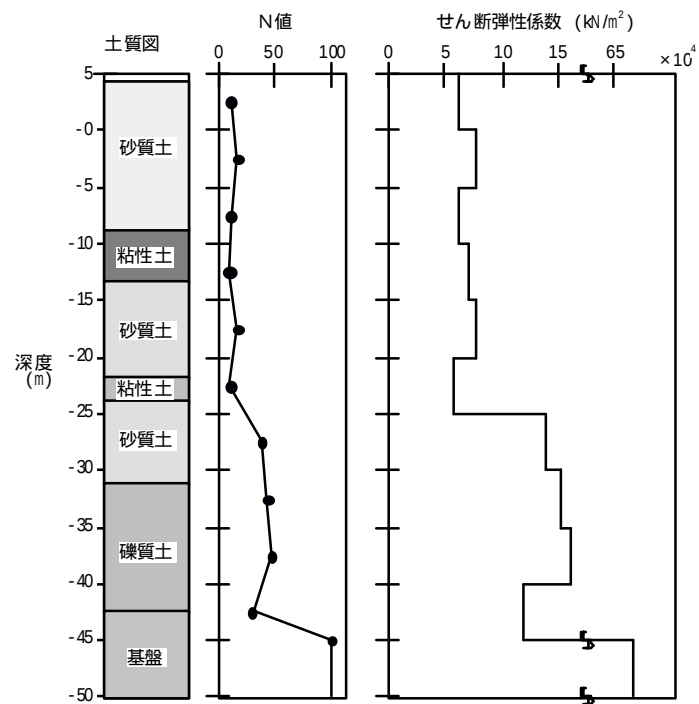


図 2-11 地盤の土質定数

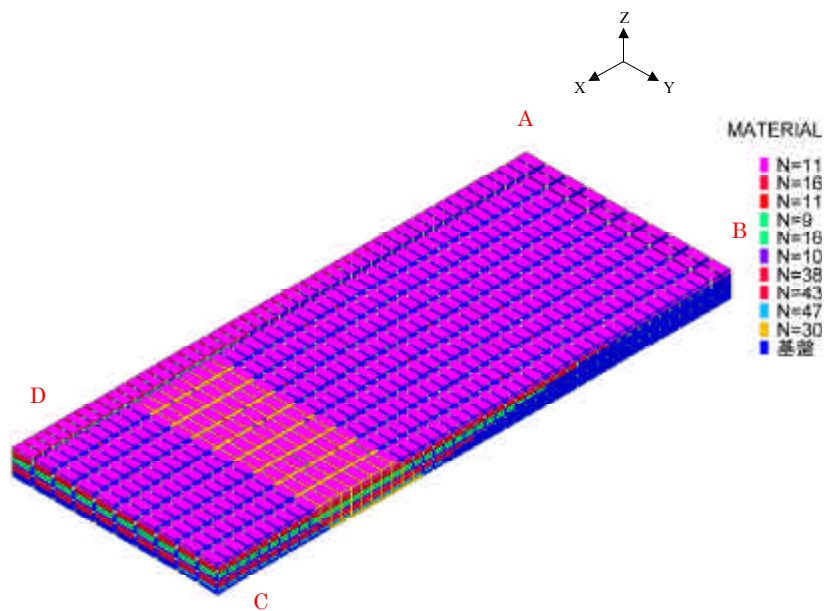


図 2-12 地盤モデル

(3)解析結果

図2-13は、図2-10に示す直線（モデルの長辺方向の中央線）に沿ったx方向、およびy方向の最大加速度の分布である。傾斜に直交するx方向の加速度分布を見ると軟質土層が水平に堆積している場所で、最大加速度が生じているが、傾斜に平行なy方向の加速度分布を見ると地層の傾斜している場所で最大加速度が卓越している。これらを合成して南北・東西の加速度分布を示せば、図2-14のようになり、両方向とも傾斜地盤直上で加速度が増幅することが明らかである。解析結果の南北方向の最大値は420ガル、東西方向は311ガルで、観測記録と比較して計算値が小さいが、地盤定数は1カ所のボーリングデータを使用して、それが解析モデル全体に広がっている仮定したこと、およびモデルのメッシュ分割が粗いこと等に問題があると考えられる。今後は解析モデルを精緻化してさらに検討を加える予定である。

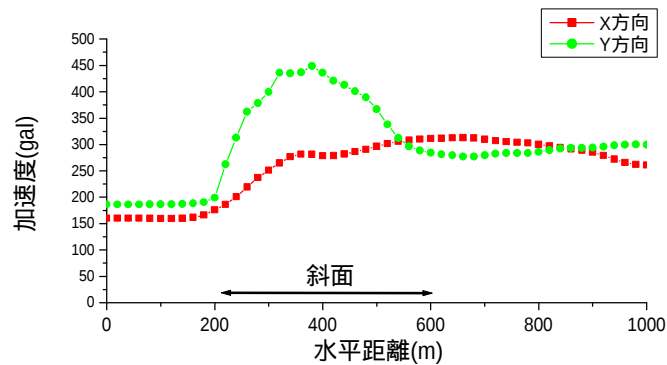


図 2 - 13 モデル中央断面(北東 - 南西方向)における X および Y 方向の加速度分布(地表面)

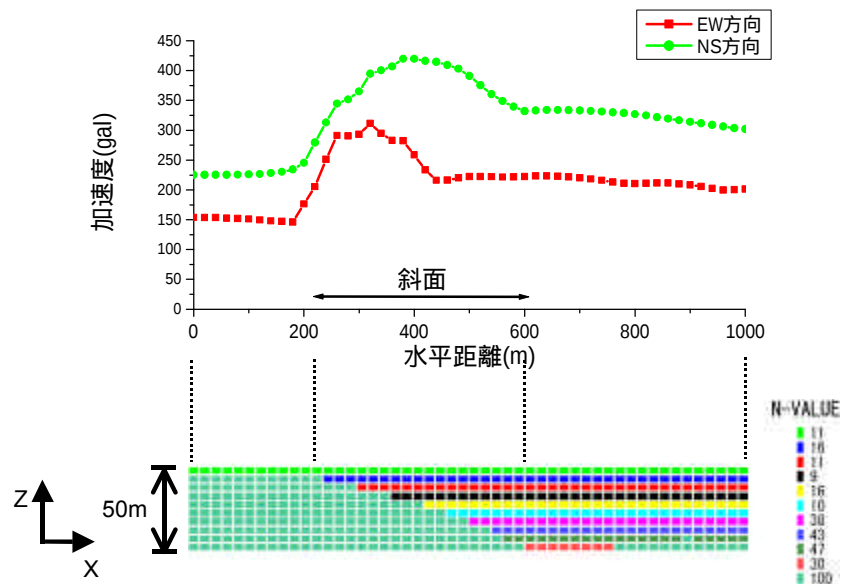


図 2-14 モデル中央断面(北東-南西方向)における南東および東西方向の加速度分布(地表面)

(4)まとめ

本研究では，福岡県西方沖地震で特に建築物の被害が大きかった大名・今泉地区の地表面揺れの原因を検証するため，有限要素法を用いて不整形地盤の時刻歴応答解析を行った．被害の大きかった基盤面が傾斜しているところで，大きな地表面加速度が得られ，観測結果とほぼ整合する結果を得ることが出来た．

謝辞

㈱建設技術研究所には，地表面および地下 - 65m地点での加速度データを提供して頂いた．また，防災科学技術研究所の K-net の強震記録を使用した．記して謝意を表します．