

2.2 加速度記録

1995年兵庫県南部地震以降、全国的にK-NET等多く地震計が設置されるようになった。この地震でもK-NET(強震ネット)²⁾やKiK-net(基盤強震ネット)²⁾により記録が得られている。図2.8に地震観測点を示す。なお、ページ数の関係から個々の記録やサイトの特性は示さないで、上記インターネットサイトや、文献⁷⁾などを参照されたい。

これらの観測点のうち、代表的な地点で得られた強震波形記録を図2.9に示す。また、震央近傍の水平合成最大加速度分布を図2.10に示す。図2.11および図2.12~2.13は、防災科学技術研究所²⁾がまとめたK-NETおよびKiK-netによる地表および地中の最大加速度分布である。江府から新見にかけて 800cm/s^2 (以下galと表示)を超える地震動が作用したことが分る。また地中の最大加速度は震源近傍の狭い範囲で400gal程度の値が観測され、ほぼ同心円状の分布をしているのに対し、地表での最大加速度は震源域より南方にかけて大きな値を示す地域が現われ、震源の西方にかけてもやや大きな加速度を示す地域が現れて地中での最大加速度分布形状とは異なった分布形状となっていることが分かる。

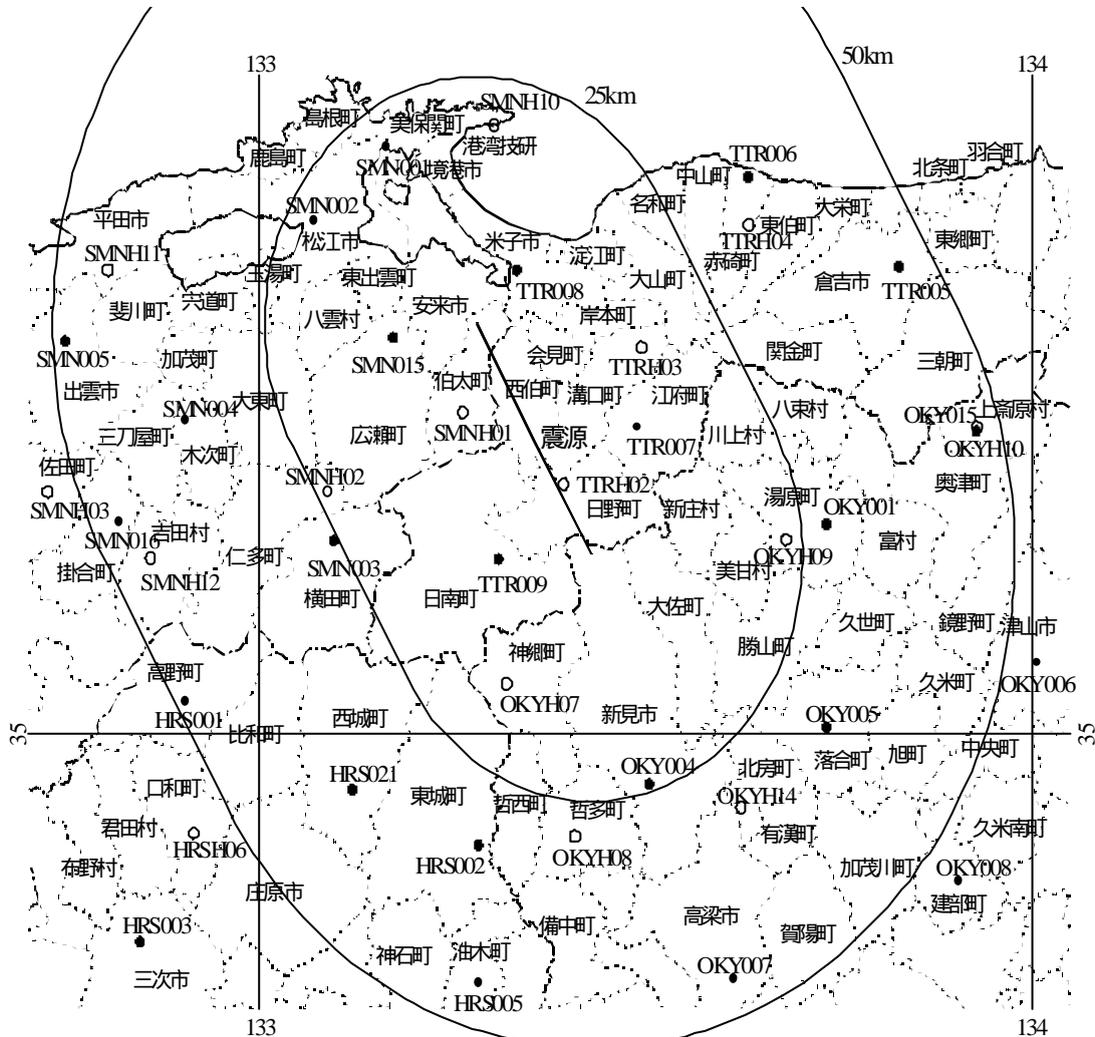


図 2.8 断層周辺における地震観測点

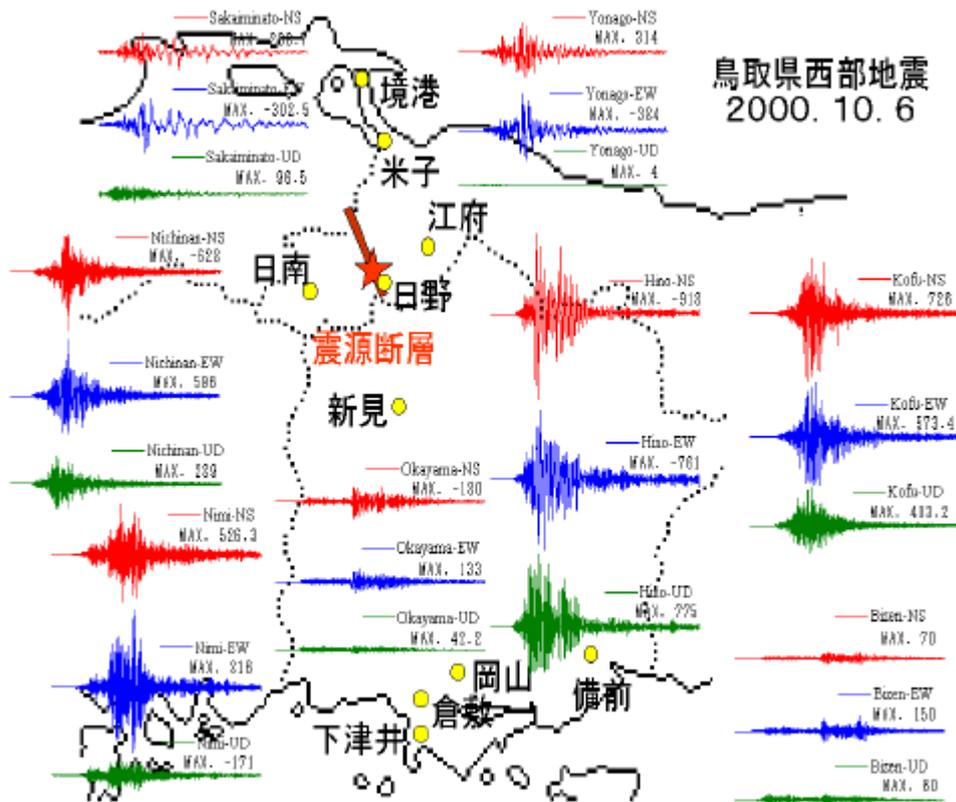


図 2.9 強震記録波形 (K-NET² , KiK-net² , 運輸省⁸)

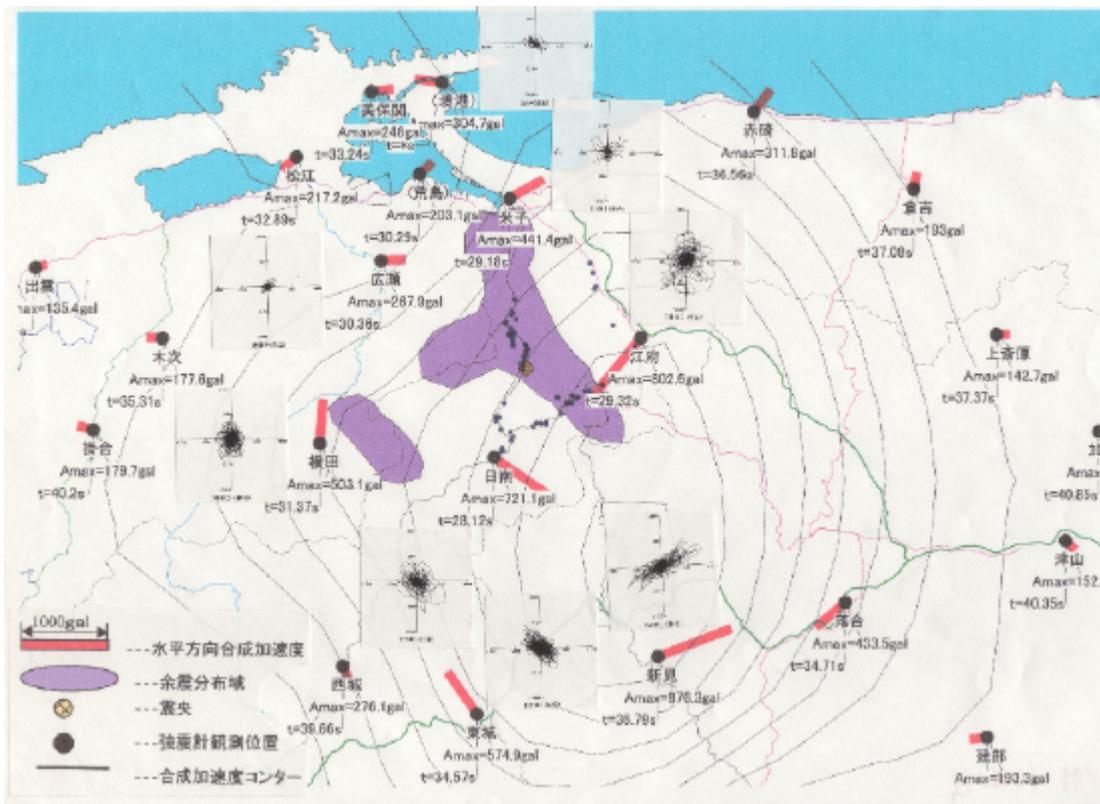


図 2.10 震央近傍の水平合成最大加速度分布

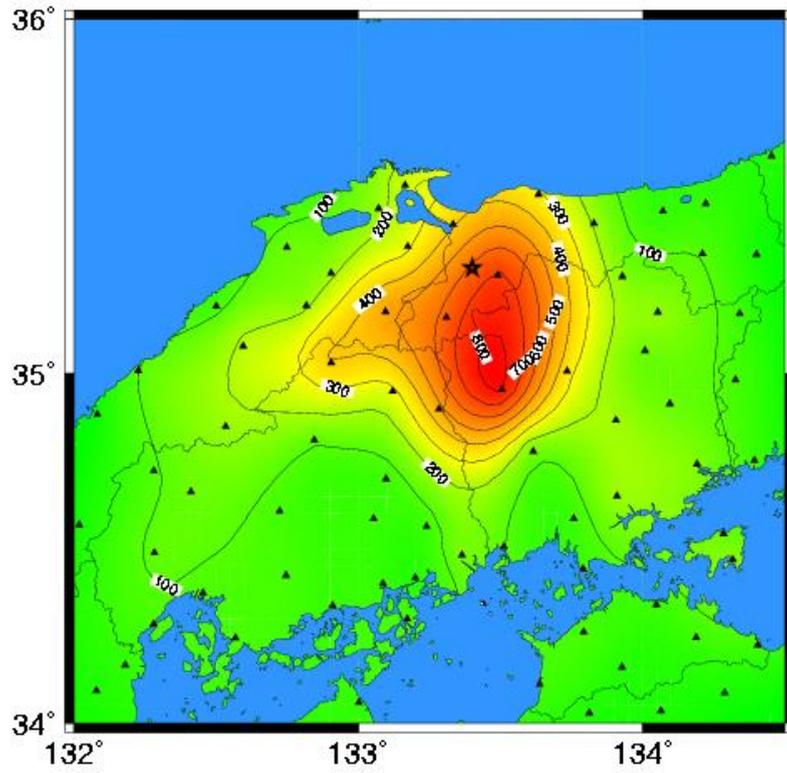


図 2.11 K-NET による最大加速度分布²⁾

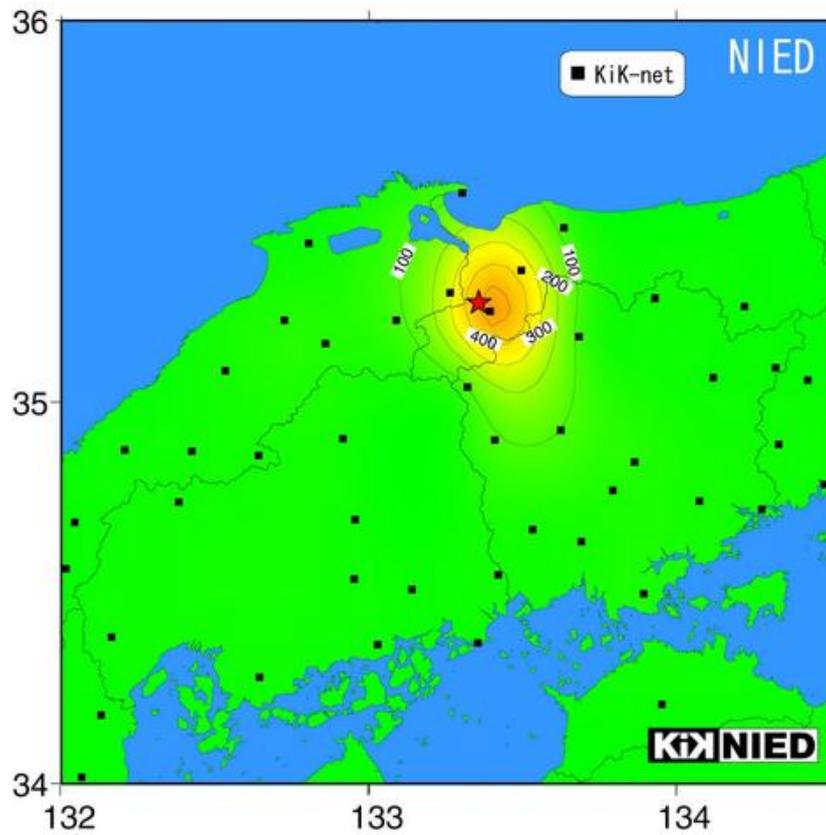


図 2.12 KiK-net による地中の最大加速度分布²⁾

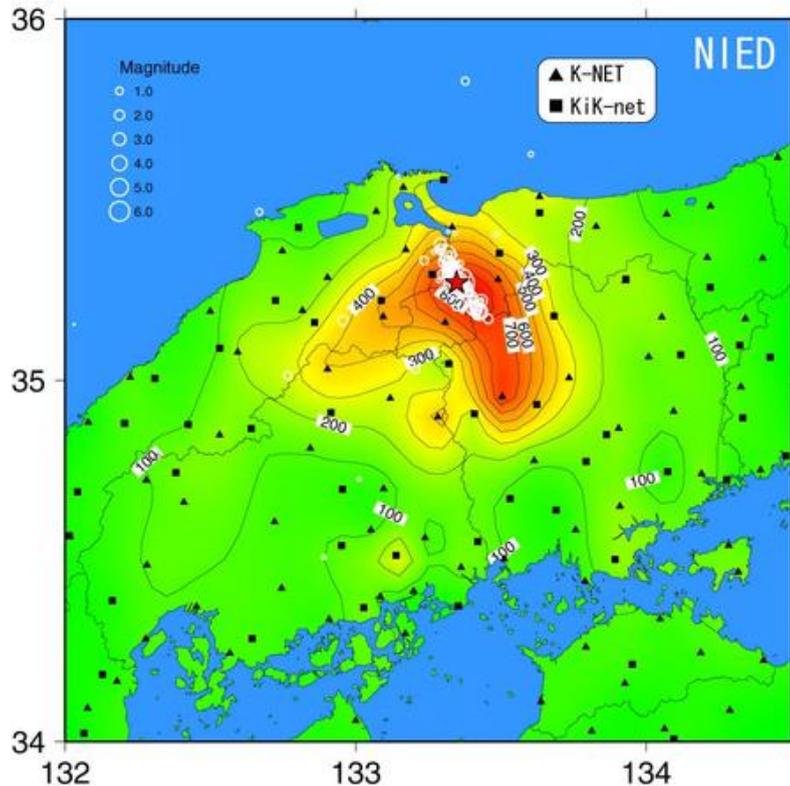


図 2.13 K-NET および KiK-net による地表の最大加速度分布および震源分布²⁾

人家の比較的多い米子から安来にかけての中海沿岸部では観測点は少ないものの、建設省³⁾(当時)の観測点や運輸省⁸⁾(当時)の観測結果を合わせて考察すると、余震域の北側では地震動は 200~300gal 程度であったと推定される。なお中海湖岸で観測された建設省³⁾(当時)の加速度記録では観測開始後 16 秒くらいから図 2.14 に示すように周期が長くなっており、この箇所の地盤条件と合わせて考えると液状化した結果と考えられる。そのような目で見ると、米子の記録についても観測点直下の地盤液状化が疑われる。

図 2.15 は震央近傍の 8 観測地点での観測記録全体の加速度オービット(a)と最大加速度となる時間をはさむ 1 秒間のオービット(b)である。この図に示すように余震域より南側では加速度オービットは北北東から南南西に卓越した軸を持ち、震央の北側の米子ではこのような卓越した軸は見られない。

図 2.16 に震源周辺観測点での変位オービットの軌跡を示す。図には震源および断層も示されている。断層の南東の延長上にある地点では断層と直交する方向の成分が卓越している。しかし、中海の東にある TTR008 (米子) や SMNH10 (美保関), 境港 (港湾技研) ではほぼ東西方向の成分が卓越しており、他の記録と性質を異にしているが、これは地下構造の影響を大きく受けているためと考えられる。一方、鳥取県中部の TTRH04 や島根県中部の SMNH03 など、断層の直交方向で断層から 30km 離れた観測点では断層平行方向の成分が卓越している。これら、断層方向との関係が明瞭な地点に比べ、断層のごく近傍では挙動は複雑であるが、これは、ラディエーション、ディレクティビティ、破壊過程、地形効果など多くの要因が関係していると考えられる。

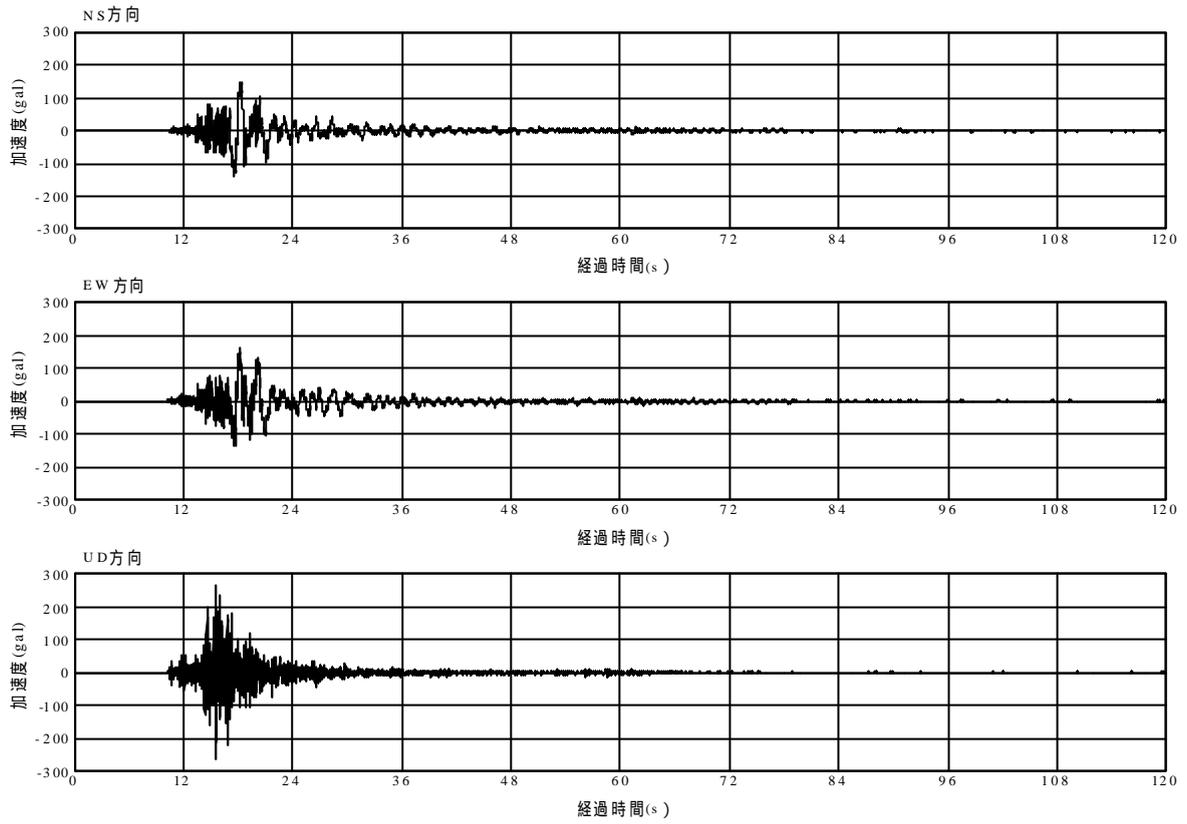
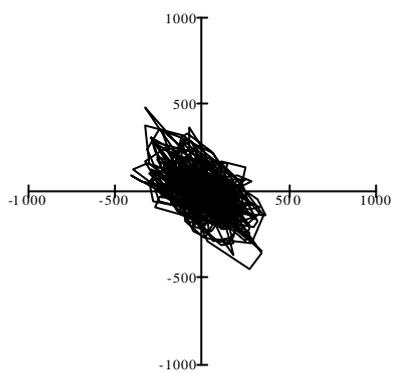
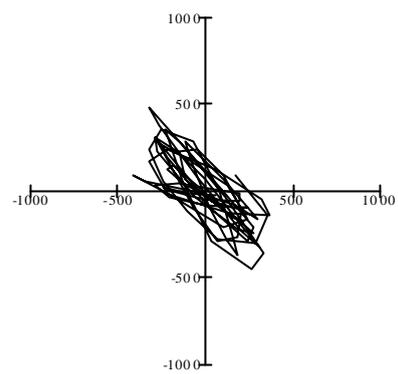


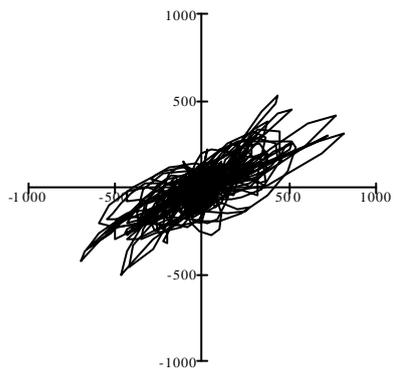
図 2.14 中海湖岸堤の観測加速度記録(建設省³⁾による)



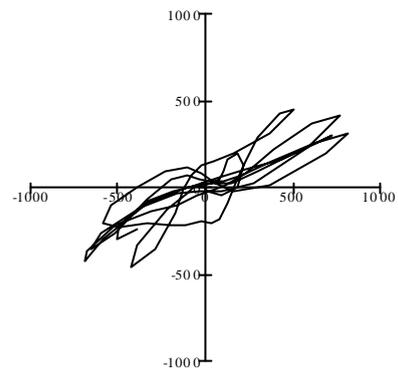
HRS002(東城)(a)



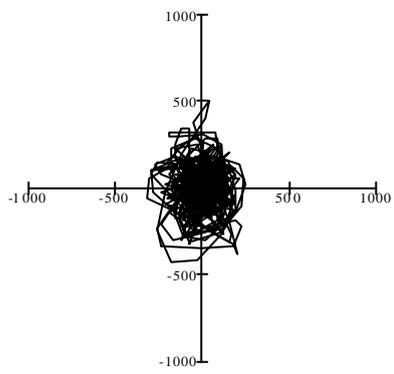
HRS002(東城)(b)



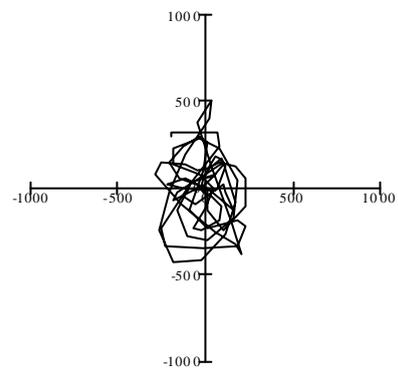
OKY004(新見)(a)



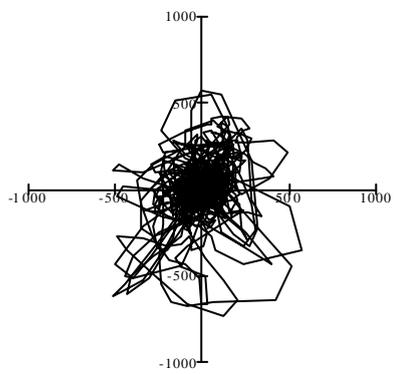
OKY004(新見)(b)



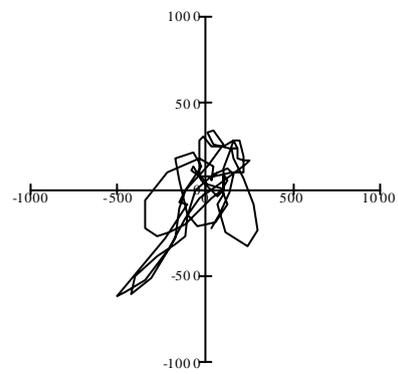
SMN003(横田)(a)



SMN003(横田)(b)

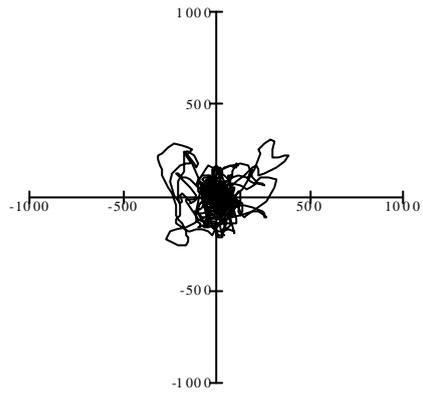


TTR007(江府)(a)

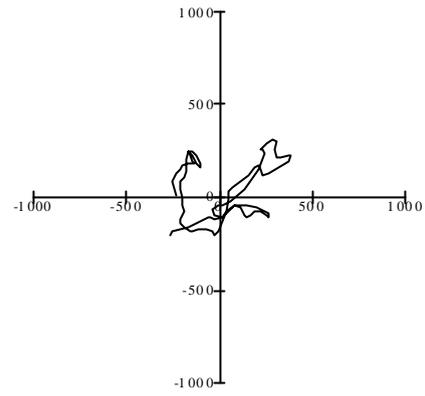


TTR007(江府)(b)

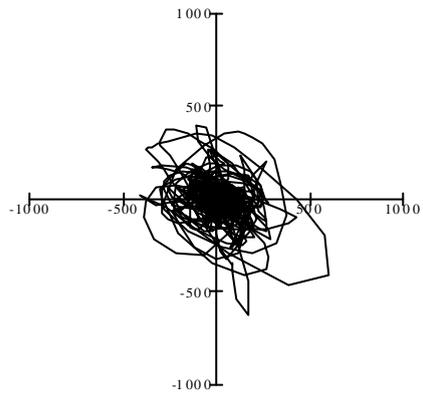
図 2.15 震源近傍の加速度オービット(その1)



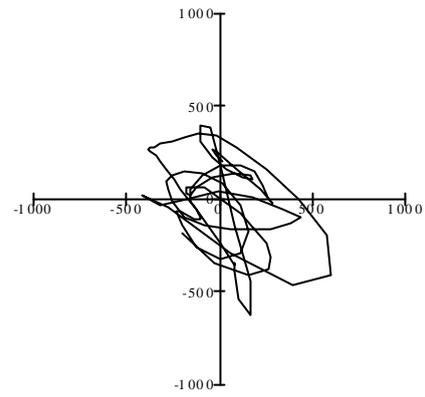
TTR008 (米子) (a)



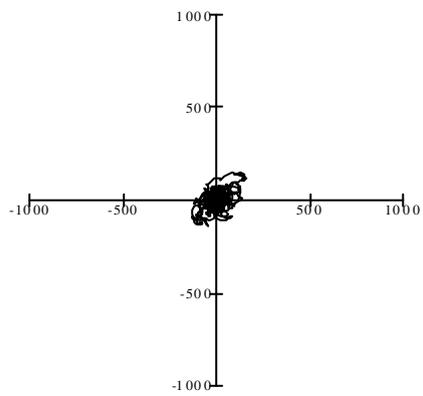
TTR008 (米子) (b)



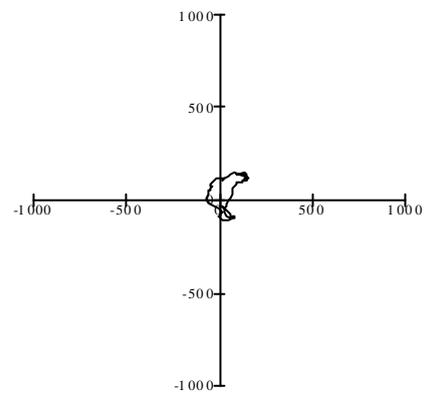
TTR009 (日南) (a)



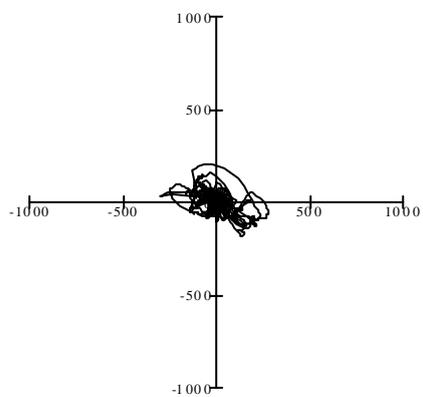
TTR009 (日南) (b)



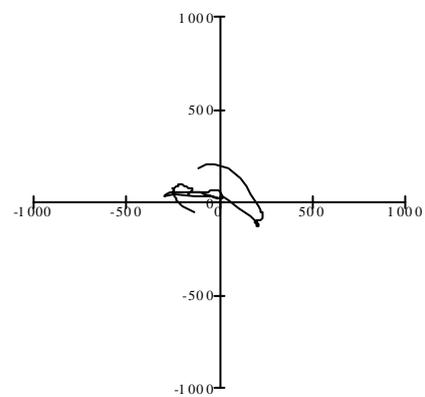
建設省 (荒島) (a)



建設省 (荒島) (b)



運輸省 (境港) (a)



運輸省 (境港) (b)

図 2.15 震源近傍の加速度オービット (その 2)

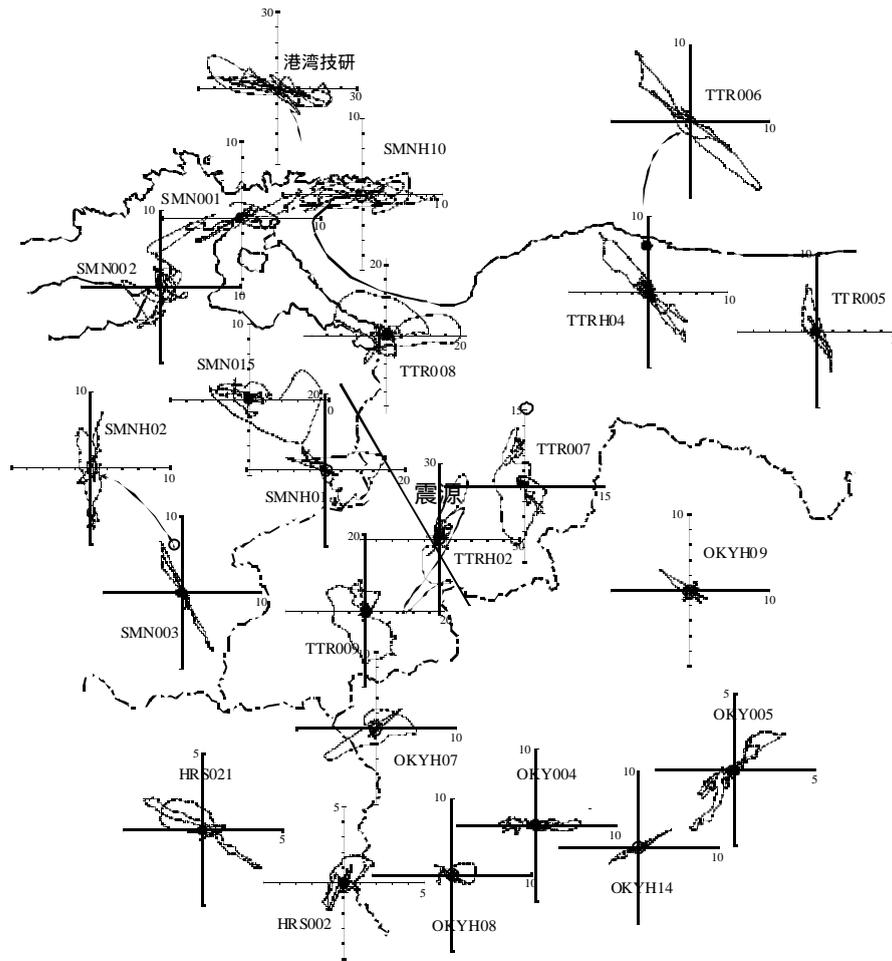


図 2.16 震源近傍の変位オービット

地震記録から計算した最大加速度および計測震度の距離減衰特性を図 2.17 と図 2.18 に示す。ここで、K-NET では水平 2 成分の最大値、KiK-net では水平面の最大値が最大加速度として用いられている。また、実線は、Shabestari and Yamazaki⁹⁾ による全国の K-NET 記録を用いた回帰分析で、次式で表わされる。

$$\text{Log}_{10}(\text{PGA}) = 1.185 + 0.352M - 0.00192r - \text{Log}_{10}r + 0.00478h \quad (1)$$

$$I_{JMA} = 1.346 + 0.855M - 0.00313r - 1.89 \text{Log}_{10}r + 0.00774h \quad (2)$$

ここで、 M ：マグニチュード、 r ：断層面からの最短距離 (km)、 h ：震源深さ (km) で、計算では、 $M = 7.3$ 、 r は図 2.8 に示した断層パラメータについて算出し、 $h = 13.5\text{km}$ としている。最大加速度はこの地震記録の方が大きいためであるが、計測震度はよく対応している。これらより、この地震は平均的な地震と考えてよい。

上の加速度波計のうち代表的なものについてフーリエ・スペクトルを図 2.19 に示した。震源近傍の日南、江府では 0.5 秒より短い周期成分で広く分布している。震源近傍でも日野は沖積層上にあり、0.7 秒付近にピークを示す。そして、2 秒にも卓越成分があるのは興味深い。後者は震源メカニズムによると思われる。沖積層の厚い米子では、1 秒より長い周期成分が卓越している。境港の波形は、途中から液状化が発生し、長周期化して 2 秒の波が卓越している。

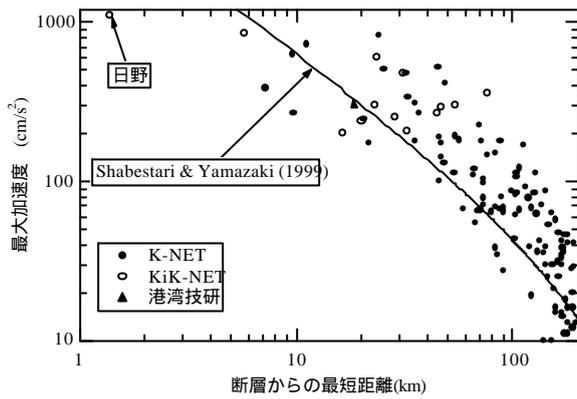


図 2.17 最大加速度の距離減衰特性

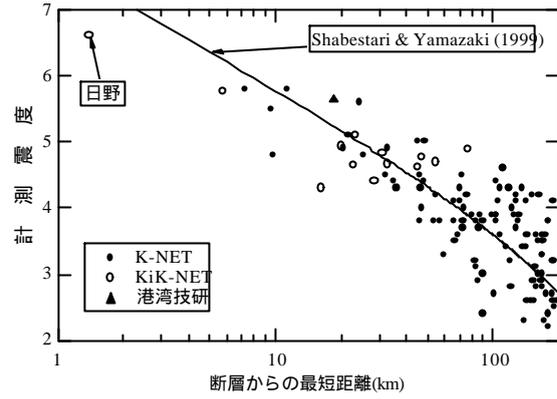


図 2.18 計測震度の距離減衰特性

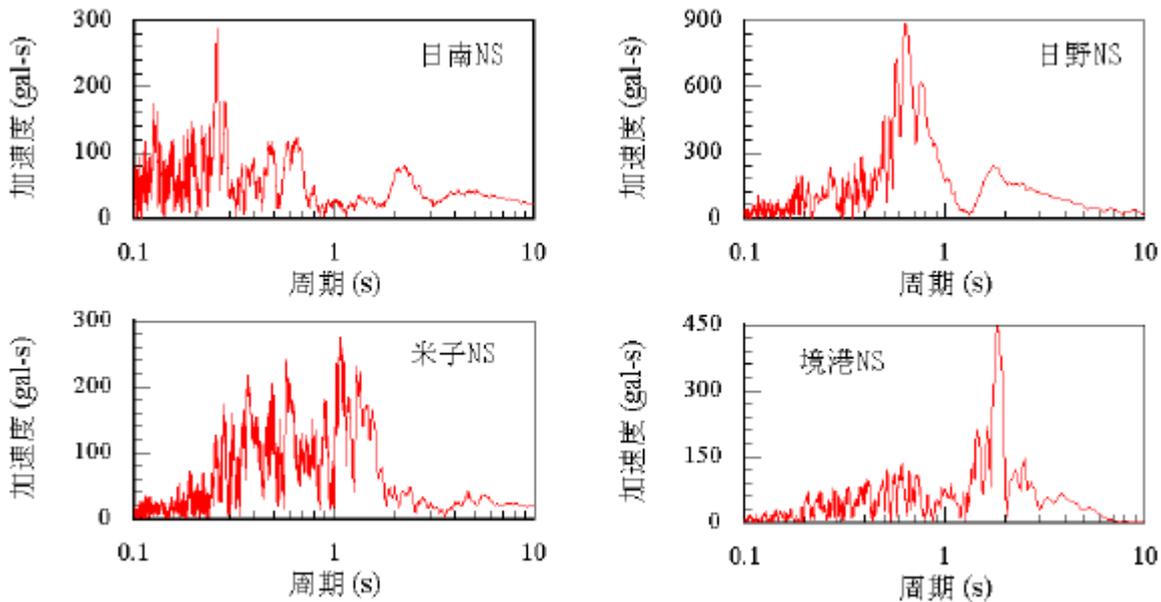


図 2.19 加速度波形のフーリエスペクトル

図 2.20 に断層周辺の観測点で得られた地震波より計算した加速度応答スペクトルを示す。また、図 2.21 に比較のために道路橋示方書¹⁰⁾のタイプ Ⅱ 応答スペクトルを示す。震源直近の日野 (TTRH02) では周期 0.5 ~ 0.8 秒の成分がきわめて大きい、住宅被害や斜面災害の多かった地域に近く、この成分の影響と考えられる。これに対し、境港、米子、松江などの低地では短周期成分が小さく、周期 1 ~ 2 秒の成分が大きい。これらの地点では、単に地震動の増幅以外に非線形化の影響も考えられる。新見、日南、東条などの山間部での観測点では 0.3 秒以下の短周期成分が卓越し、0.5 秒以上の成分は小さい。これらの地点では軟弱層はほとんどないと考えられる。これらの結果より、各地点での地震動の周期特性は、表層地盤の影響を強く受けていることが分かる。図 2.22 に代表的な地点の土性図を示す。

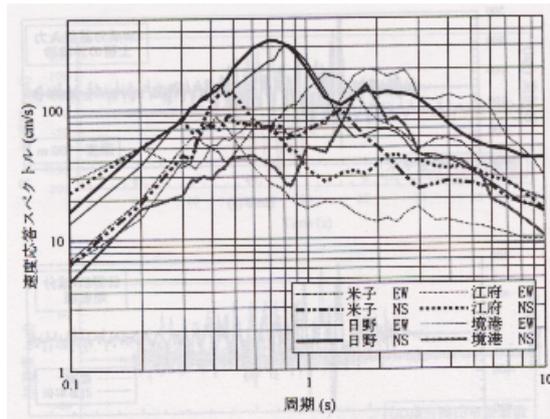


図 2.20 加速度応答スペクトル

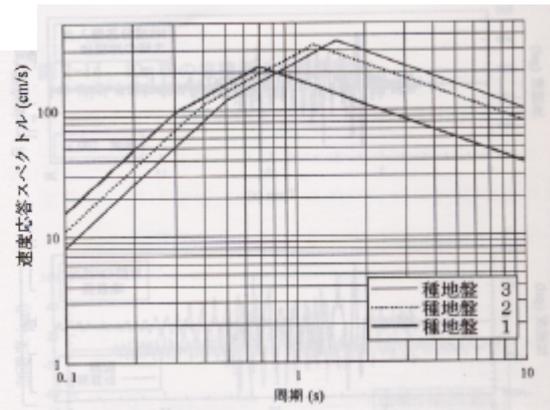


図 2.21 道路橋示方書のタイプ
応答スペクトル

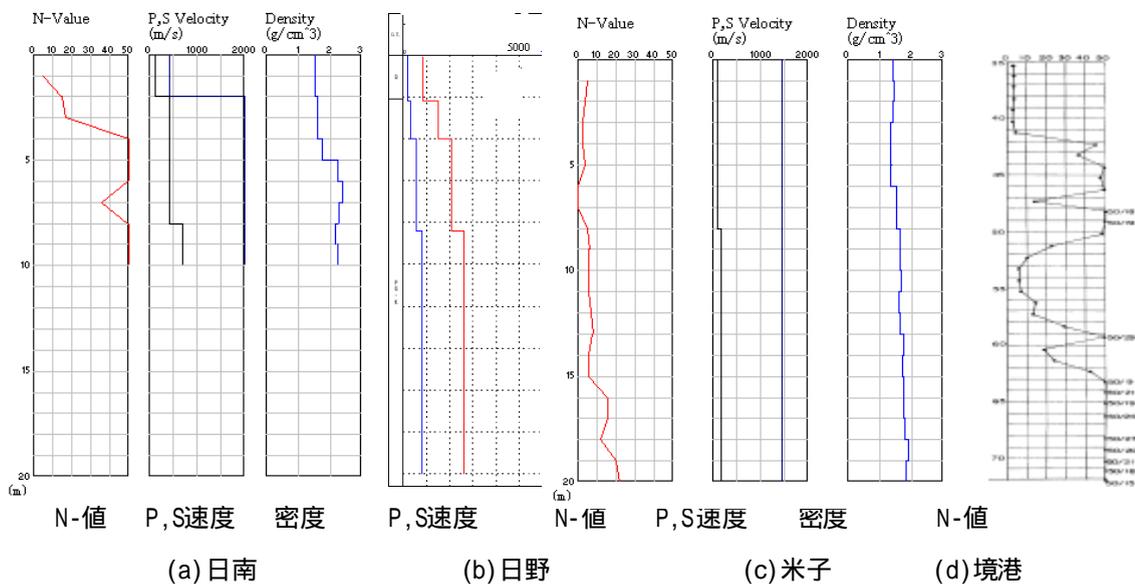


図 2.22 代表的な地点の土性図

代表的な応答スペクトルを過去の地震記録と比較して図 2.23 に示す。日野の記録(TTRH02)は周期 0.5~1 秒では最大であるが、1 秒より長い周期では急速に小さくなり、兵庫県南部地震の際の鷹取よりずっと小さくなっている。このため木造家屋に被害が発生しても壊滅的な破壊に至らなかった可能性がある。この周期帯域では、ノースリッジ地震の Sylmar や集集地震の捕里の記録より加速度応答は小さい。

山間部の江府(TTR007)の記録は 0.5 秒以下の短周期では他の大地震と同じ程度の大きさであるが、0.5 秒以上の長周期成分は非常に小さい。一方、低地の米子(TTR008)では短周期成分は小さいが、1 秒以上の長周期成分はある程度大きくなっている。

図 2.24 には、KiK-net 鉛直アレー記録から求めた地中と地表のスペクトル比を示す。ここで、地中と地表の地震計の方位が必ずしも一致していないので、二次元スペクトルの比を求めて、バンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウで平滑している。ほとんどの観測点で卓越周波数は 5Hz 以上であり、観測点が堅い地盤に設置されていることが分かる。例外は日野(TTRH02)の記録で、2Hz 付近で穏やかなピークを持ち、5Hz 以上では増幅比は 1 を下回るほど小さくなっている。これは、地盤が強い非線形挙動をしているためと考えられる。

図 2.25 は地震後行われた微動観測より、水平成分と鉛直成分の比より求めた地盤の卓越周期を示している。卓越周期は山間部で 0.2 秒、低地部で 0.5~1.0Hz であり、これまでに観測記録のスペクトル特性で論じた地震動の性質が表層地盤の特性に依存していることを裏付けている。

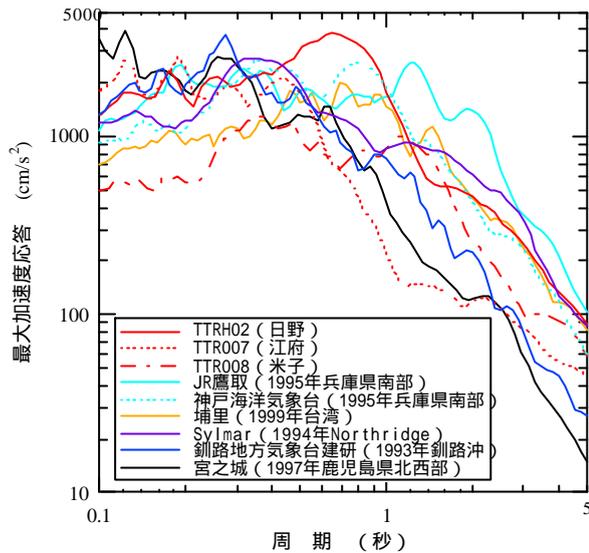


図 2.23 既往の加速度応答スペクトル (減衰5%) との比較

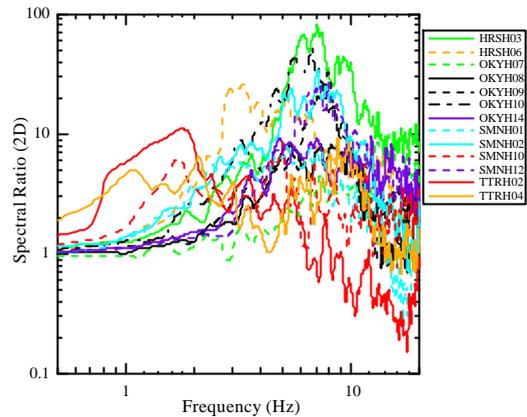


図 2.24 KiK-net 観測点におけるスペクトル比

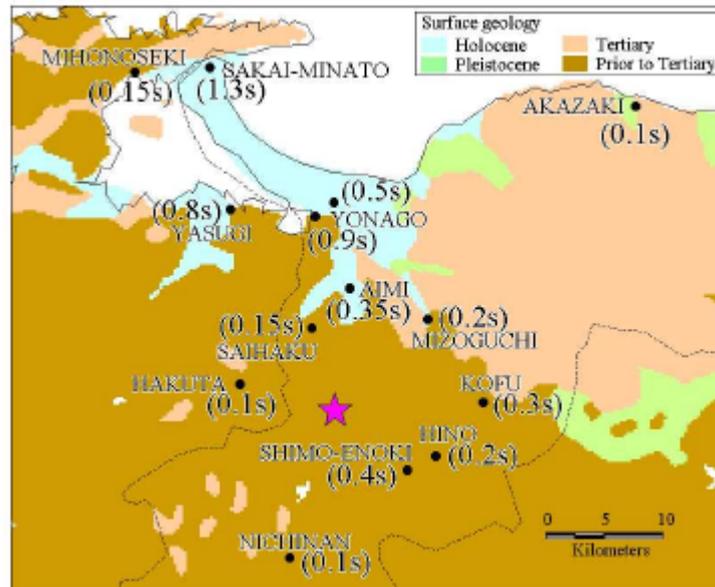


図 2.25 水平 / 鉛直スペクトルの卓越周期の分布 (翠川研究室¹¹⁾による)

KiK-net は全て鉛直アレーであるので、地中と地表のスペクトル比により伝達関数が得られる。余震記録と本震記録の比較により、地盤の非線形化の影響を評価する。TTRH02 (日野) における本震と余震のスペクトル比 (バンド幅 0.4Hz の Parzen ウィンドウで平滑化) の比較を図 2.26 に示す。一点鎖線は、PS 検層による値を用いて得られる伝達関数 (減衰2%と仮定) である。余震のスペクトル比に比べ卓越周波数が低く、また2次のピークの方が大きいので、 $h = f$ の形で減衰の周波数依存性を考慮し、伝達関数の最適化によりS波速度と減衰を逆推定する。得られたS波速度を図 2.27 に示す。解の一意性はないので様々な解が考えられるが、PS 検層の値よりかなり大きなS波速度でないと観測スペクトル比に対応しないので、深部の値を1000m/sとした。同様に強震スペクトル比についてもS波速度を求めた結果を、図 2.27 に一点鎖線で示す。深度40m以深では剛性低下はないものとしている。浅部では著しい剛性低下と減衰の増大が見られる。深度約10mまでは砂礫層、それ以深は花崗岩である。震源近傍の極めて大きな地震動を予測するためには、砂礫や風化岩の物性のひずみ依存性を今後明らかにする必要があると思われる。

米子市・境港市では4点で記録が得られている。加速度波形の比較を図 2.28 に（時刻は統一していない）、加速度応答スペクトルの比較を図 2.29 に示す。米子測候所では卓越周期が短く、硬質地盤であることがわかる。同じ米子市内でも、K-NET では周期 1 秒付近の成分が大きく、表層地盤による増幅を受けている。境港の2点では、いずれも周期 2 秒弱にピークを有する類似した形状を示している。短周期成分では測候所の方が大きく、昭和町にある港湾技術観測点では液状化により短周期成分が小さくなったものと推察される。

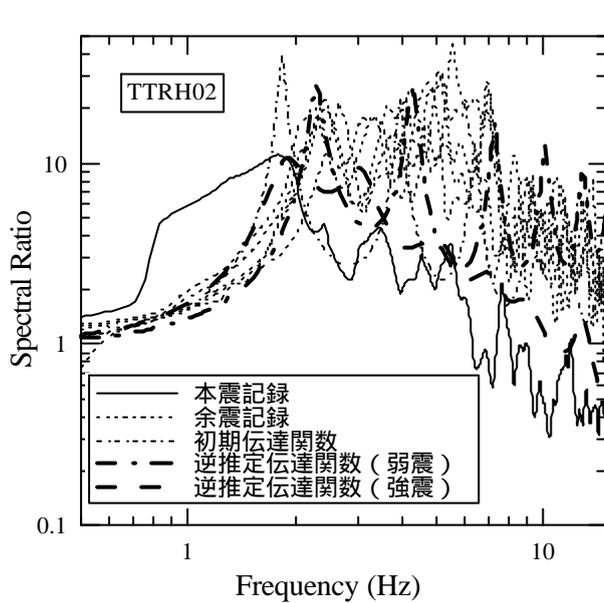


図 2.26 TTRH02 におけるスペクトル比

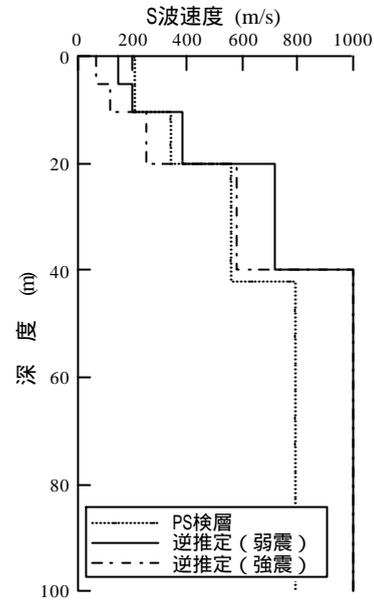


図 2.27 逆推定による S 波速度構造

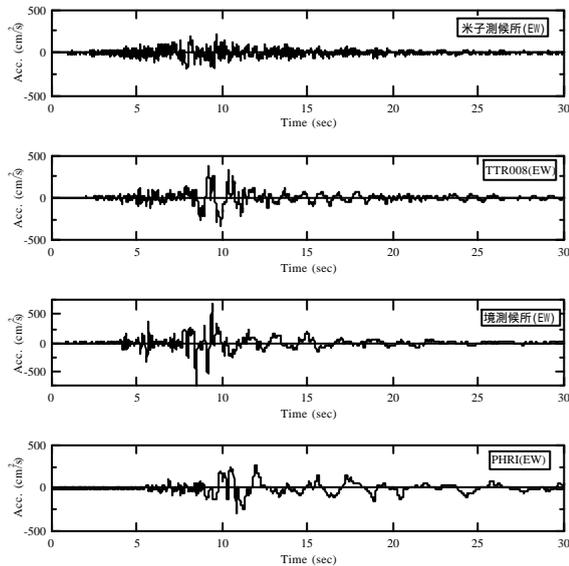


図 2.28 米子・境港における 加速度波形の比較

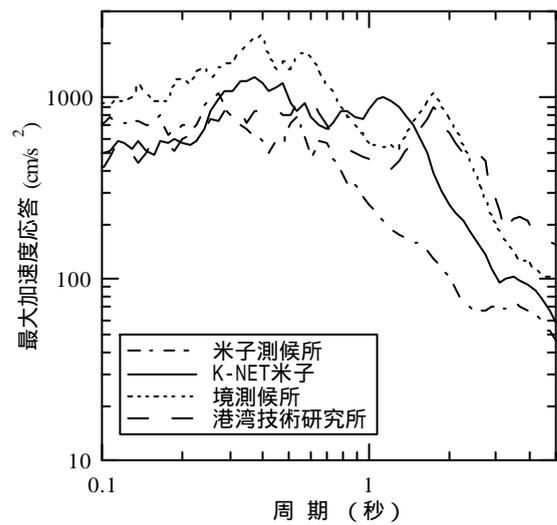


図 2.29 加速度応答スペクトル (米子・境港)

第5章 液状化

この章では、液状化について報告する。まず 5.1 で液状化発生地点と噴砂の状況を報告し、5.2 以降では、調査地点ごとの状況について報告する。

5.1 液状化発生地点と噴砂

5.1.1 液状化地点の分布

鳥取県西部地震による液状化被害は、震央から約 35km 以内に位置する米子市、日吉津村、境港市、八束町、松江市、安来市などの中海周辺および弓ヶ浜半島外縁部に点在する干拓地および埋め立て地で発生した。液状化の発生は、多くの場合、地表に噴砂を引き起こす。構造物や施設の被害で、原則として噴砂などを伴っている場合を液状化被害という。緊急調査団の現地踏査によって噴砂の痕跡を確認した地点を図 5.1～5.3 に示す。東は日野川の右岸から西は中海の堤防まで広く分布している。液状化地点の分布は主に弓ヶ浜半島周辺の水際で見られるが半島内部の内陸部でも一部に噴砂が見られる。これらも後述するように人工的な埋め土造成地のようなものである。噴砂確認地点の地形は埋め立て地、干拓地、自然地盤（旧河道）、造成地盤に分類されるようである。

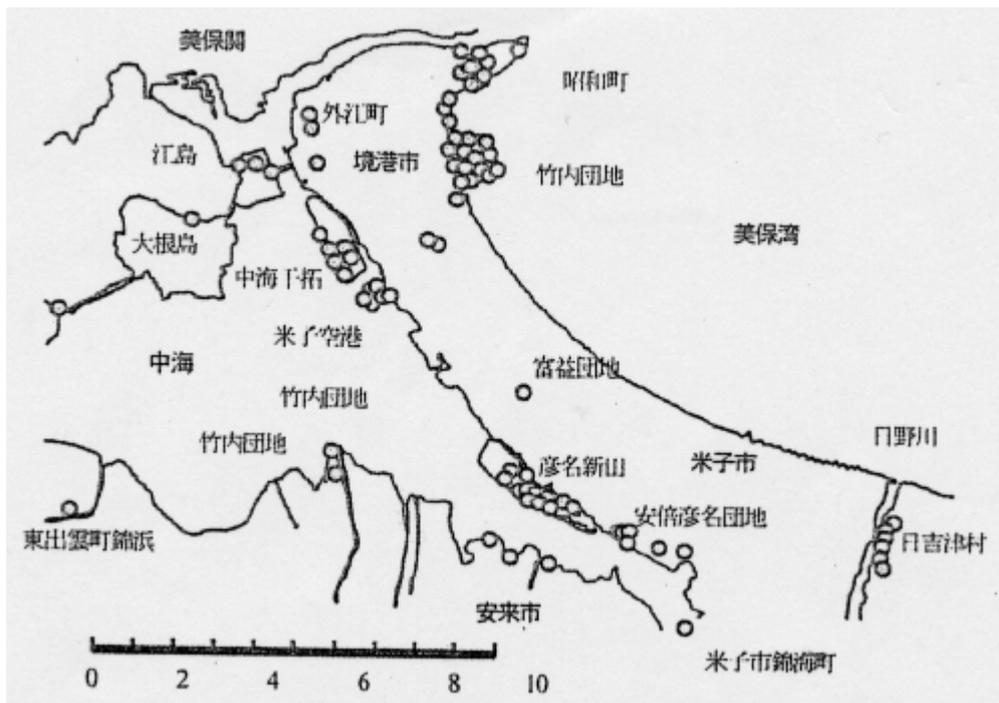


図 5.1 噴砂確認地点（東畑ら）

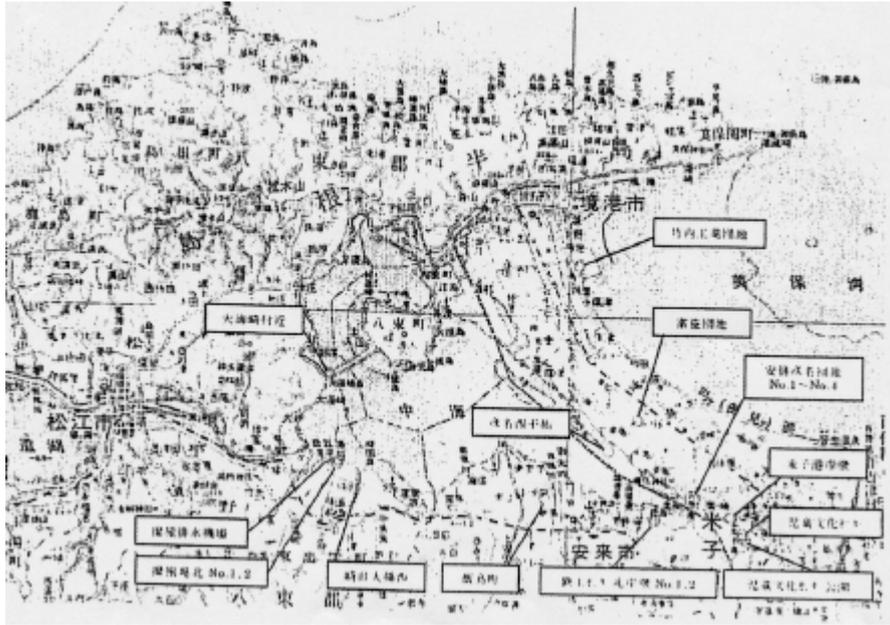


図 5.2 噴砂確認地点（森）

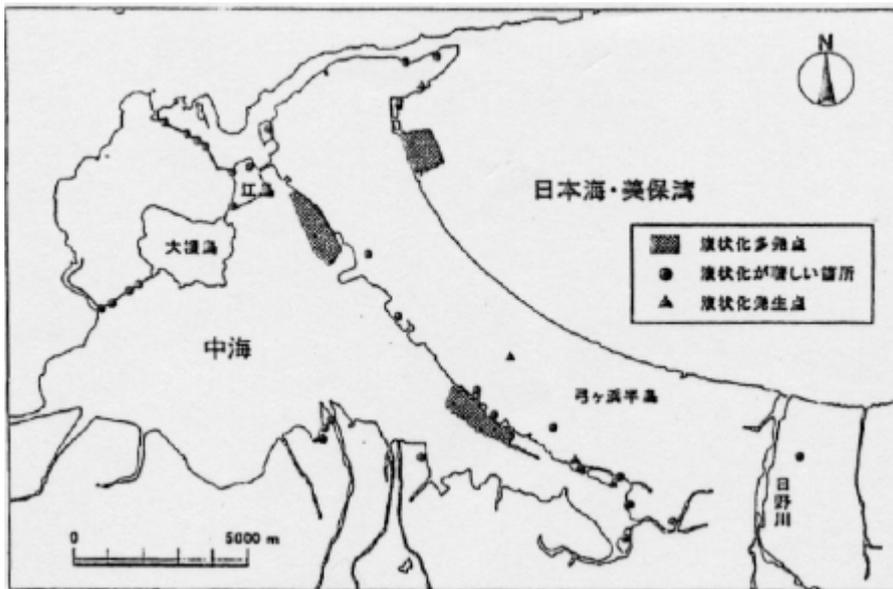


図 5.3 噴砂確認地点（藤村）

境港市昭和町、境港市竹内工業団地、境港市外江町、境港市米子空港（美保基地）などは浚渫埋め立て地である。これらの地区では、岸壁のせりだし、エプロンの沈下、道路の浮き上がりや波打ち、舗装の盛り上がり・舗装版の亀裂や舗装版同士の衝突などの変状、構造物との段差、水道管の破損、水路河岸のせりだし、水路底の盛り上がり、建物周辺部の地盤沈下などの被害が見られた。噴砂は主に灰色である。

弓ヶ浜半島より西に位置する飯梨川河口や安来市の安来港、昭和 43 年から 55 年にかけて建設された中海干拓堤防の馬渡堤防、大海崎堤防、森山堤防でも堤防に生じた亀裂、局所的崩壊とともに、その周辺では噴砂が確認されている。

境港市中海干拓（弓浜干拓）、米子市彦名新田（彦名干拓）、米子市錦海団地、安来市新十神町などの干拓

地・埋め立て地ではまさ土の噴砂が多い。干拓地では畑地に多くの亀裂・段差と噴砂が見られた。亀裂と噴砂は線状に延びるものが多く、亀裂開口部や掘削により確認できたものの多くで撒水用の塩ビ製水道管の埋設方向と一致していた。現地では噴砂を採取して調べている農業関係調査員の話によれば、液状化により噴出してきた水には塩分を含むものが多く、耕作が不能になるということであった。

日吉津村の皆生大橋より南の日野川沿いの畑地や安来市赤江町の畑地には赤っぽいまさ土の噴砂が見られた。旧河道の自然堆積物であろうか。畑地の被害のみで構造物には被害はない。

造成地の被害としては、米子市富益団地、安倍彦名団地、崎津団地、錦海団地などで噴砂が見られ、富益団地、安倍彦名団地などでは家屋の沈下・傾斜の被害があり、上下水道、道路などについても被害があった。

図 5.4 や図 5.5 は大正 6 年、昭和 22 年、平成 11 年に国土地理院から発行された 2 万 5 千分の 1 の地形図を示している。これらの図から、陸地部分の増減を調べると、弓ヶ浜半島的美保湾と中海側に農業用地、工業用地や住宅のために年をおって干拓や埋め立てが行われたことが分かり、埋め立てや干拓の変遷として整理することができる。

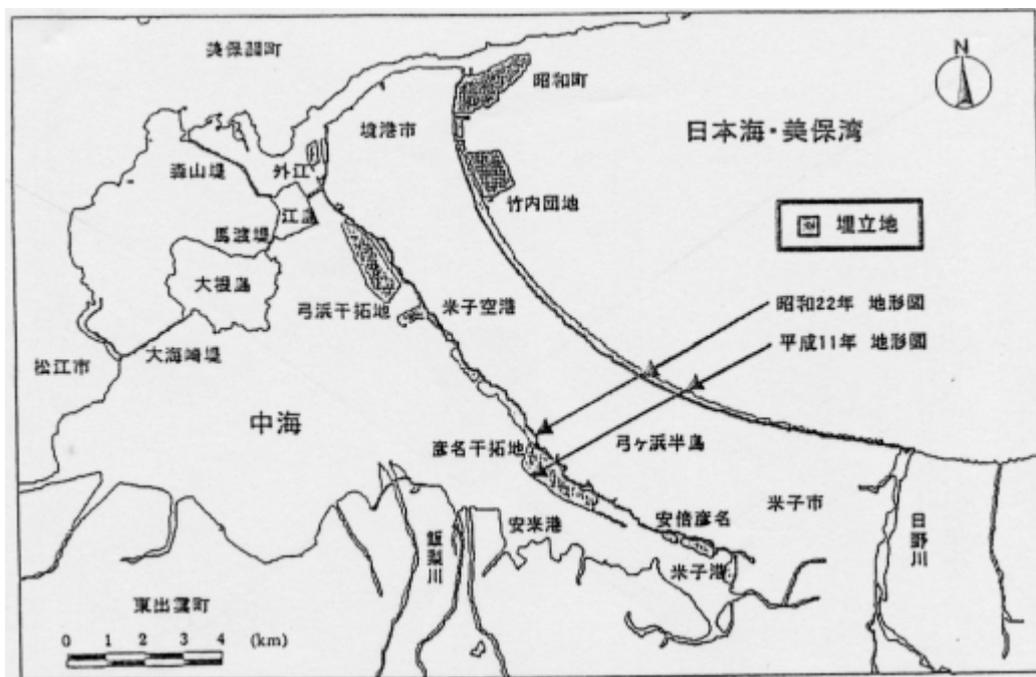


図 5.4 地形図の変遷

図 5.1～図 5.4 と図 5.5 を比べると、戦後に埋め立てられた土地、とりわけ昭和 50 年以降に干拓された弓浜干拓地や彦名干拓地、埋め立てられた竹内工業団地に集中して液状化が発生したことが分かり、戦後の埋め立て地の分布と噴砂の分布とは非常に似通っている。したがって、この地域に分布する沖積砂質地盤の中でも、ごく若い地盤（埋め立て地盤）が液状化し易かったことが分かる。それとは対照的に、弓ヶ浜半島の東側、日野川河口から竹内工業団地に至る美保湾側の沿岸では液状化は確認できず、自然堆積地盤ではほとんど液状化が発生しなかった。

図 5.6 に主な液状化被害地点として噴砂確認地点、堤体亀裂確認地点、道路亀裂確認地点の分布状況を示した。

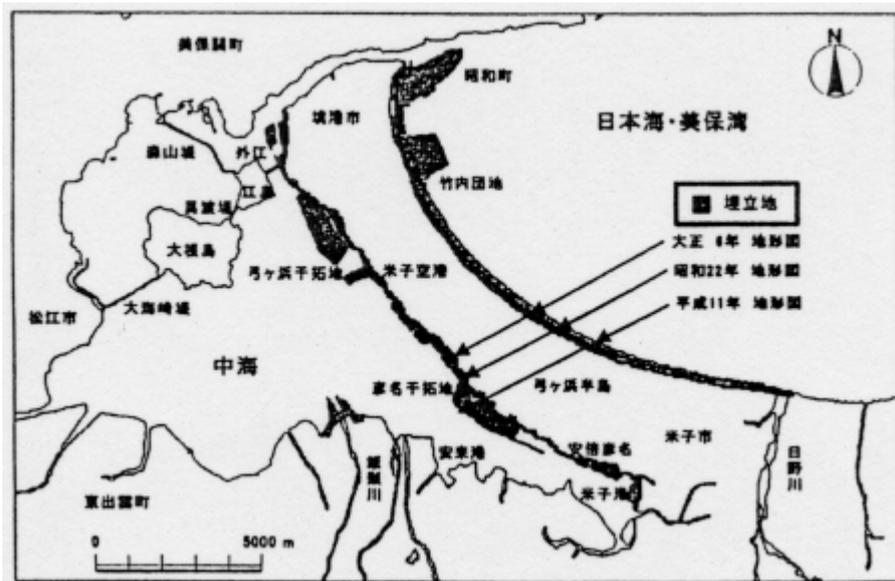


図 5.5 戦後の埋め立て地だけを強調した図

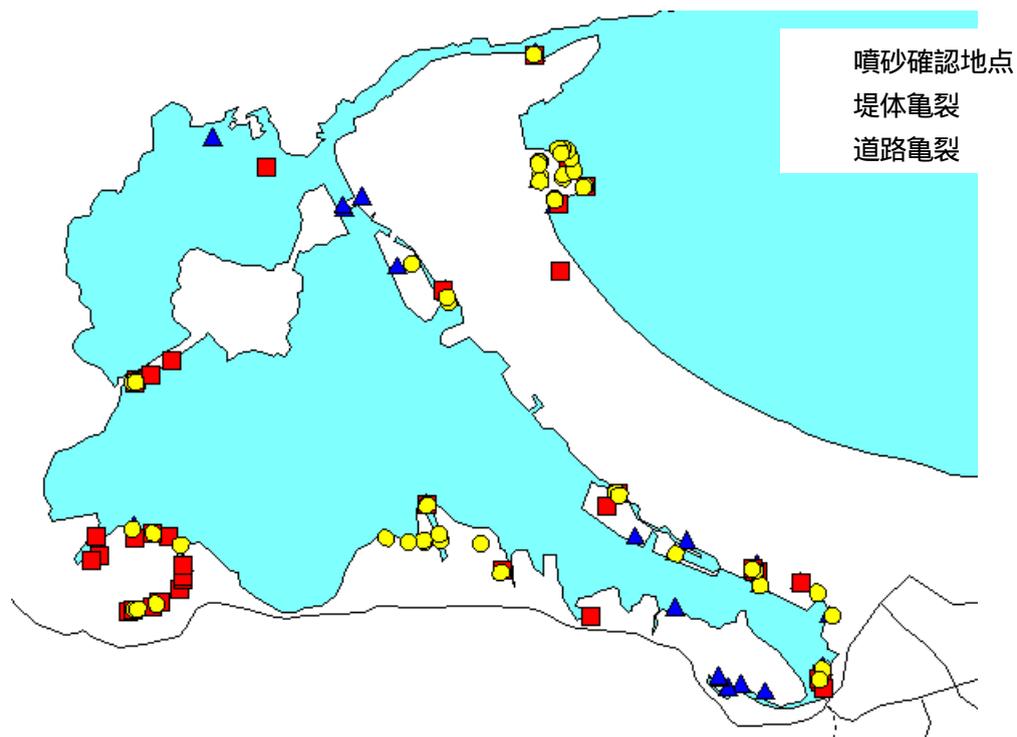


図 5.6 主な被害地点および噴砂確認地点

中海と美保湾を区切る弓ヶ浜半島は、日野川左岸から中海と美保湾の間に突き出す全長 18km、幅 4km 前後の砂州であり、砂州の先端は境水道に迫っている。砂州全般は、標高 TP+6m 程度であり、ほとんどが砂からなる低平地であるが、砂州の上にいる砂丘は TP+20m 程度を越えるものがある。この地域を含む鳥取県の既往ボーリング資料は鳥取大学が中心となって「鳥取県地盤図 ((社)地盤工学会中国支部)」¹⁾にとりまとめられている。これによって弓ヶ浜半島周辺の地盤構成を眺めてみると、図 5.6~5.7 のようである。図 5.7 は竹内団地を横切る東西の地盤、図 5.8 は富益団地付近を横断する東西断面である。

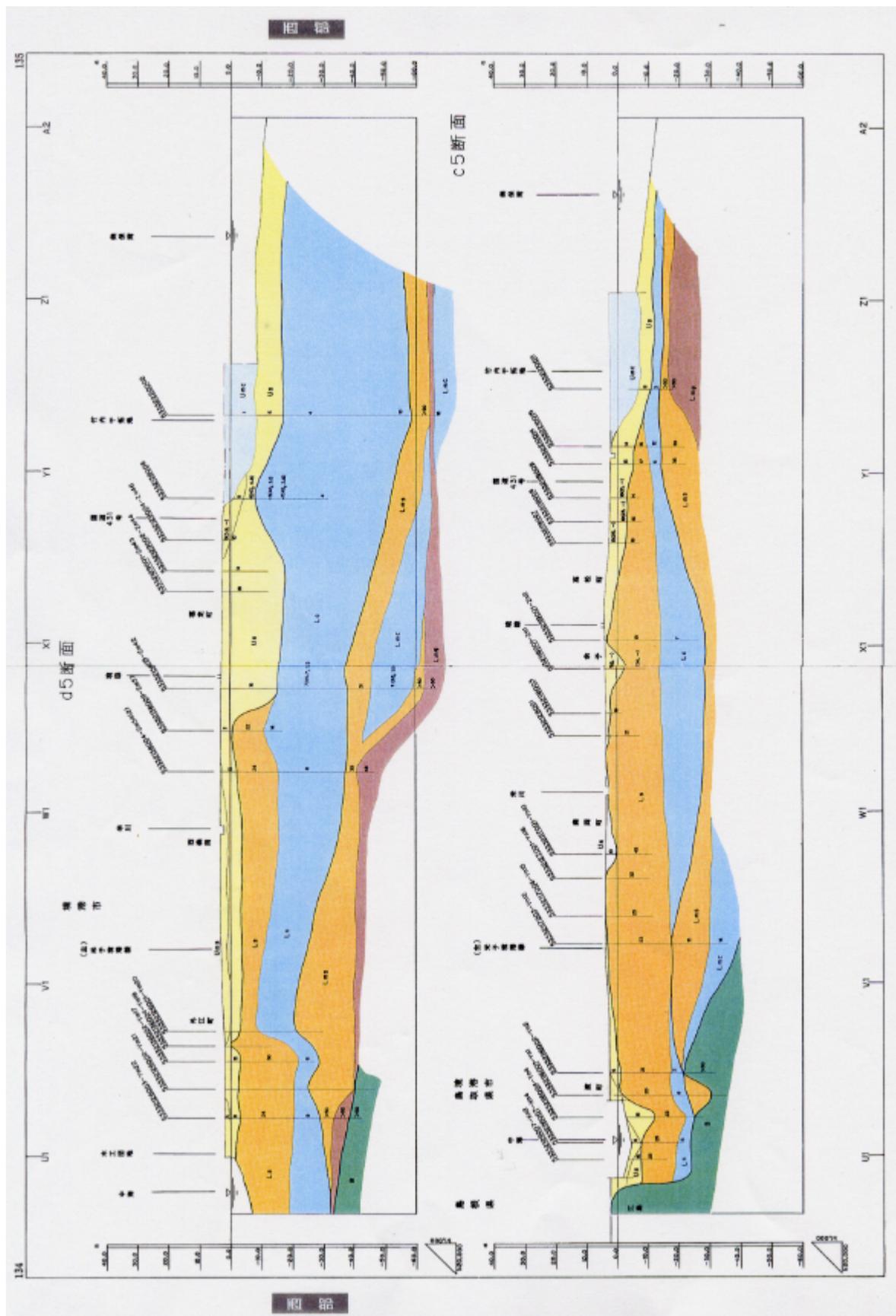


図 5.7 竹内団地を横切る東西の地盤

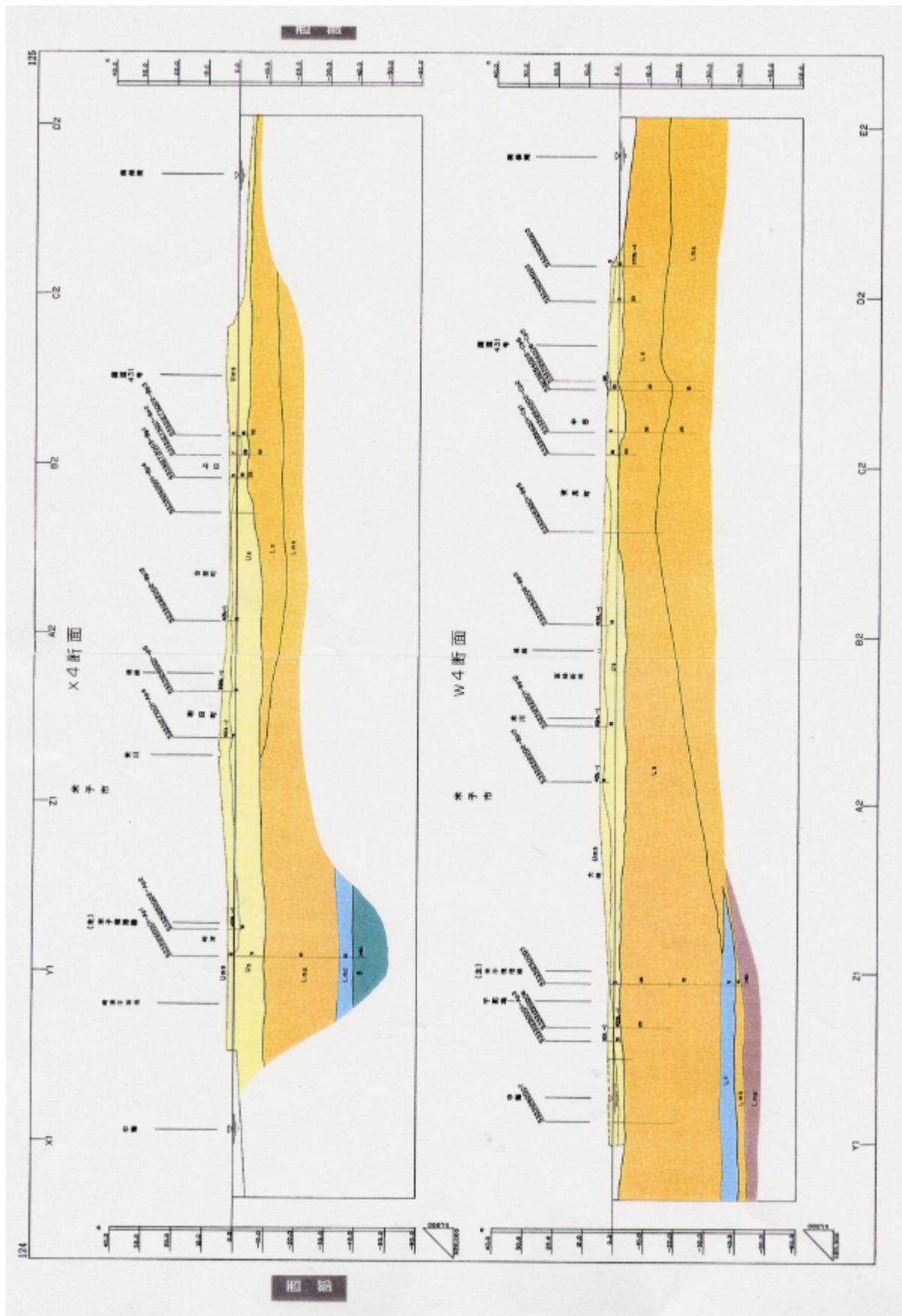


図 5.8 富益団地付近を横断する東西断面

5.1.2 噴砂の粒度分析結果

噴砂の確認された位置での採取試料の粒度試験は、調査団団員の属する幾つかの機関で行われているが、これらの試験結果による噴砂の粒度分布を図 5.9~ 5.14 に示す。

図 5.9 には、鳥取県西部地震で発生した様々な地点の噴砂の粒径加積曲線²⁾を示す。これに示されるように、他地区では細砂が主体であったのに対し、通常竹内工業団地の噴砂は約90%がシルト、粘土であった。

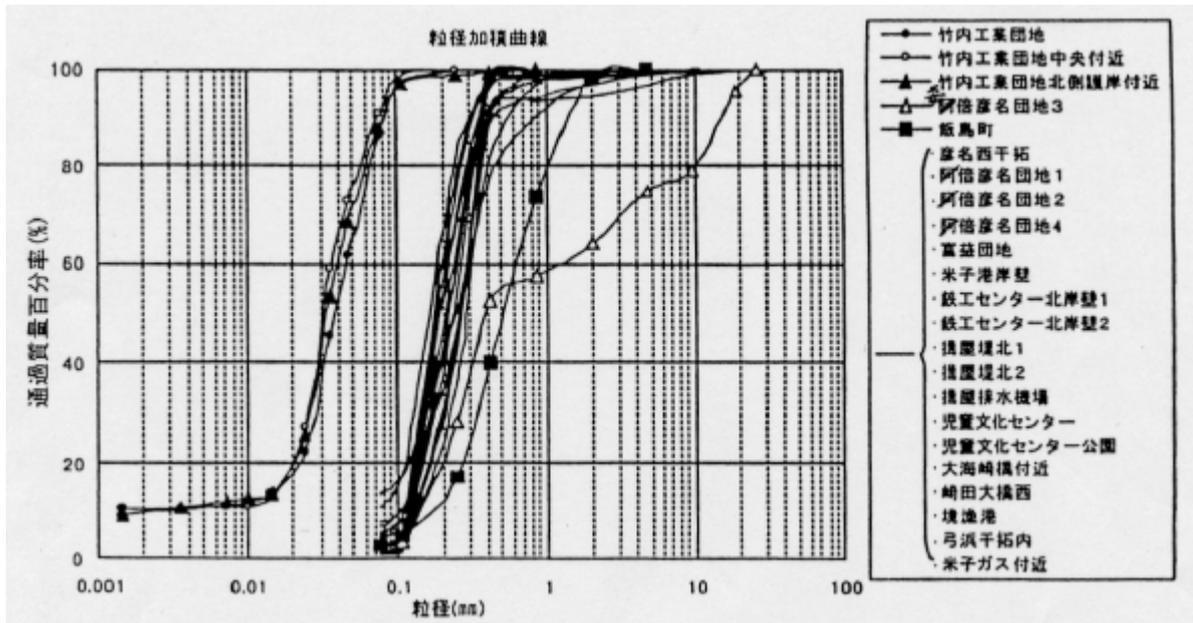


図 5.9 噴砂の粒度分布

液状化地点から噴砂を採取して粒度特性や液性限界などの物理特性を調べた。代表として、図 5.10 に浚渫埋立地として2箇所噴砂の、図 5.11 に干拓地と自然地盤(旧河道)の噴砂の粒径加積曲線を示す。竹内団地内のケーソン置き場背後では、堆積した噴砂が最大厚さ 20~30cm、広さ 80m×120m 程度にわたって広がっていた。この地点については200kgの試料を採取した。細粒分は88%もあり暗灰色のシルトである。米子空港は、貝殻混じりの細砂であるが、細粒分は少ない。ただし、一部で粘土分の塊(20cm厚の板状が割れたもの)が噴出しているので、浚渫埋立の際のポンプ吐き出しによる可能性がある。

図 5.11 の噴砂のうち中海干拓は灰色の中砂であるが赤江はまさ土である。赤江の噴砂は礫分が14%含まれている。データは示さないが、礫に分類されるまさ土も少なくない。

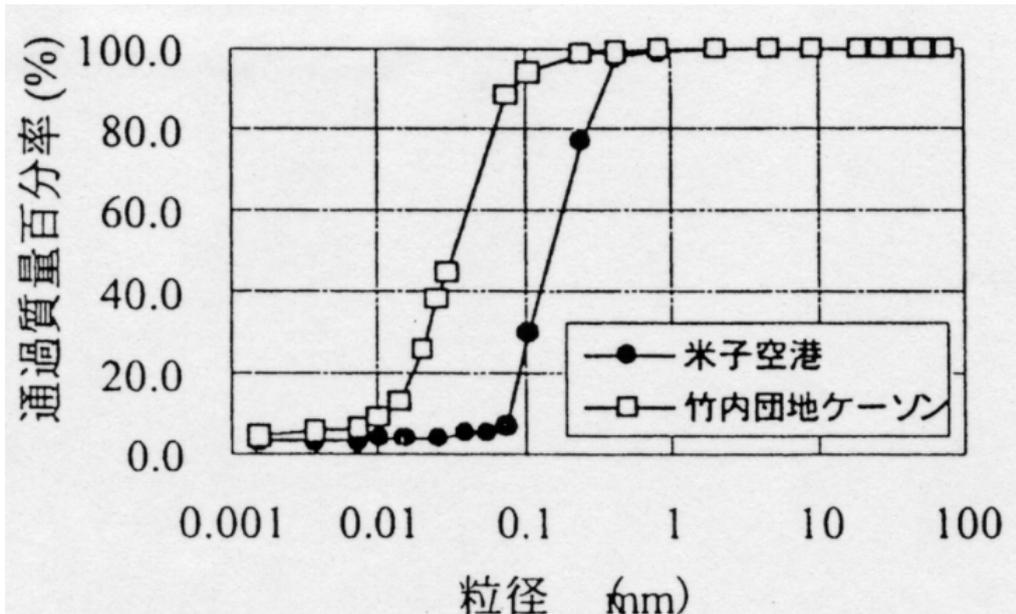


図 5.10 噴砂の粒度分布（浚渫埋立地）

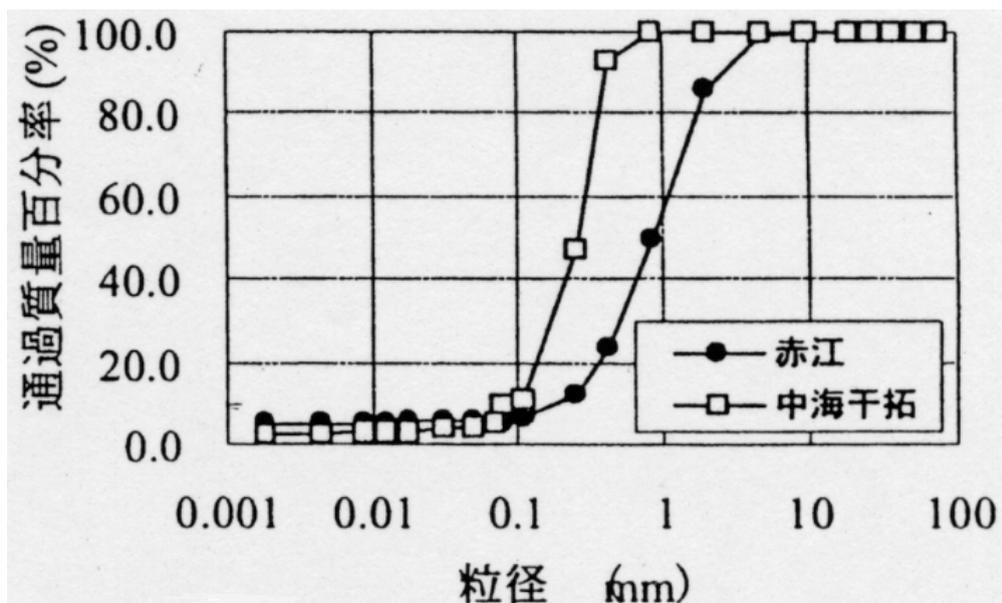


図 5.11 噴砂の粒度分布（自然地盤）

また竹内工業団地で噴砂を採取して粒度分布を調べた別の調査では、75 ミクロン以下の細粒分が 85.9%、5 ミクロン以下の成分が 10%あった。そして 50%粒径が 0.037mm であった（図 5.12）。後述するが、このように粒径の細かい地盤では、スウェーデン貫入抵抗から N 値への換算も再検討を要するものの、このように細粒土で液状化が発生したことが重要である。過去には塑性のないシルトとして分類される鉋さいが液状化した例（1978年1月の持越鉋山）があり、これと同様の状況であろう。

図 5.13 に竹内工業団地内のカワバタ印刷における工場建設時の土質柱状図を示す。これでも地表～3m までシルト、3m～8.5m までシルト混じり微砂、8.5m～11.75m まで砂質シルトと、シルトが多い地層構成となっている。また 11.75m までは N 値が 0～3 と非常にゆるい。

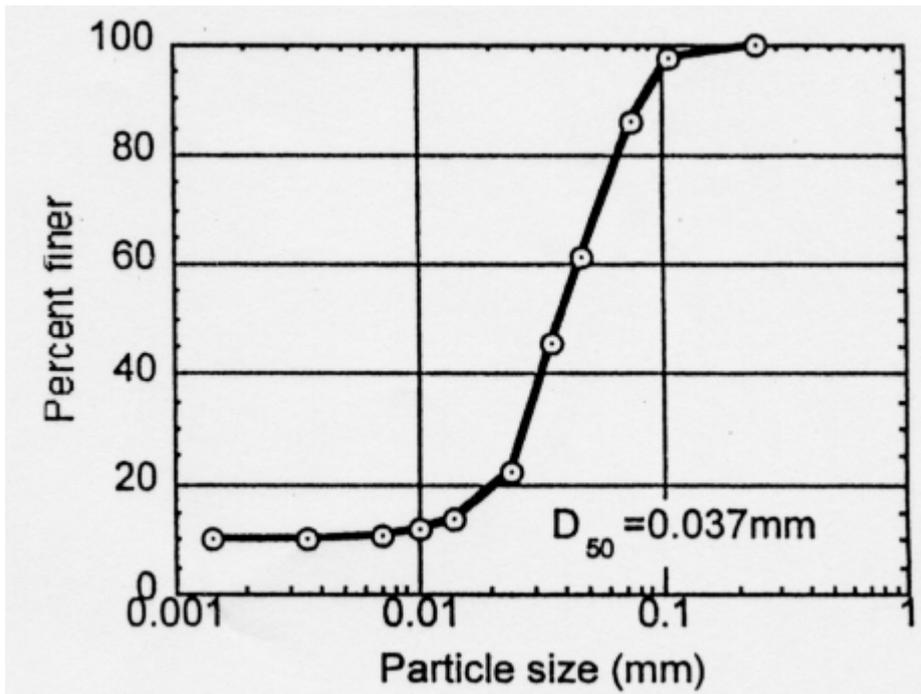


図 5.12 噴砂の粒度分布

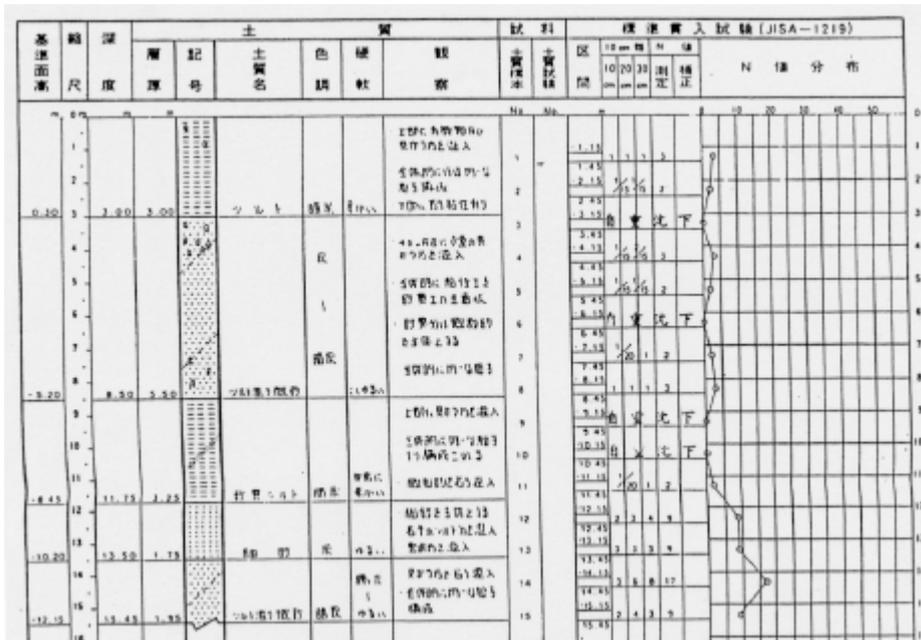


図 5.13 竹内工業団地の土質柱状図例(カワバタ印刷より提供)

図 5.14 の粒度分析結果を見ても、図 5.8 と同様、他地区では細砂が主体であったのに対し、竹内工業団地の噴砂は約 80%以上がシルト、粘土であった事がわかる。

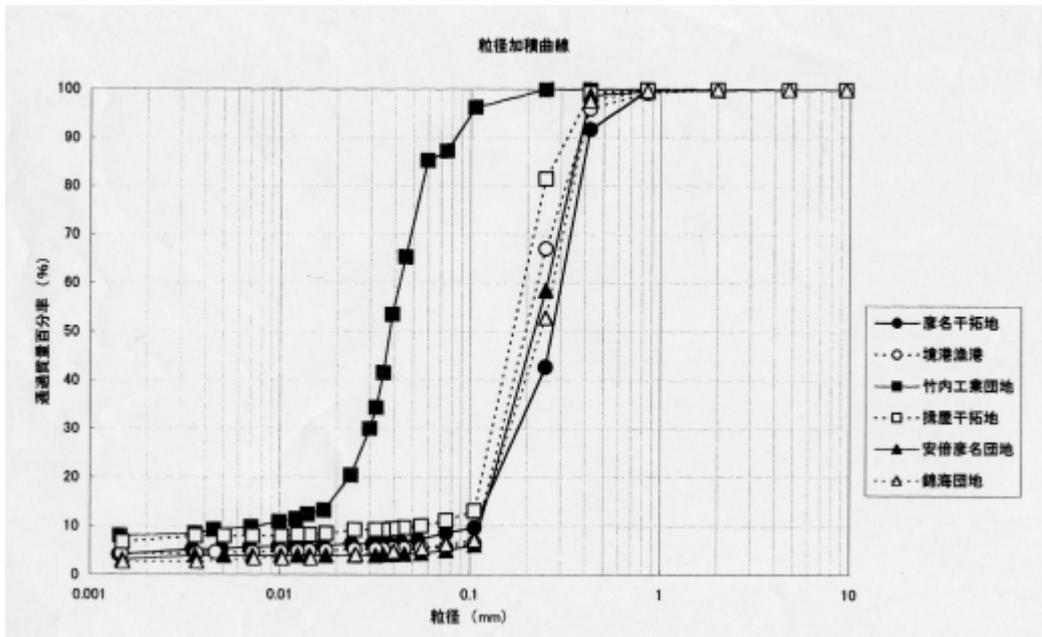


図 5.13 粒徑加積曲線

またこの他に自然堤防では皆生大橋横から日野川横の水路に沿って 1.3km の間、噴砂が続いている。安来市赤江の飯梨川河口部の畑地でも液状化があり、礫に分類されるまさ土も噴出していた。