

4. 新聞記事

朝日新聞

2000.10.6 「鳥取県西部地震ドキュメント」

<http://www.asahi.com/paper/special/tottori/text/00100602.html>

2000.10.6 「鳥取県西部で震度6強96人がけが」

<http://www.asahi.com/paper/special/tottori/text/00100601.html>

2000.10.7 「負傷者110人家屋損壊2000棟超」

<http://www.asahi.com/paper/special/tottori/text/00100702.html>

2000.10.8 「損壊5200棟、余震続く」「気象庁は今後、震度5も」

<http://www.asahi.com/paper/special/tottori/text/00100801.html>

2000.10.9 「余震続発、復旧阻む避難いつまで 雨の被害心配」

<http://www.asahi.com/paper/special/tottori/text/00100901.html>

2000.10.11 「JR伯備線、運転再開地震発生から4日ぶり」

<http://www.asahi.com/paper/special/tottori/text/00101102.html>

山陰中央新報

2000.10.7 「被害拡大、余震も相次ぐ」

<http://www.sanin-chuo.co.jp/news/2000/10/08/01.html>

朝日新聞（2000. 10. 6）

鳥取県西部地震ドキュメント

<13:30>

鳥取県西部を震源にマグニチュード7.3の地震発生。

鳥取県庁に片山善博知事を本部長とした災害対策本部を設置。同県の日野、日南、溝口の3町で9277戸が停電。

同県米子市の王子製紙米子工場は、地震を検知して自動的に操業を停止。再開のめどは立っていない。

松江市の松江赤十字病院では、玄関のガラスドアが割れた。屋上の貯水タンクもひびが入って水漏れ。

岡山県勝山町の富原小学校で、玄関上部の窓ガラスが割れた。清掃中の6年生男子の背中に落下し、軽いけが。避難中、5年生男子が階段で足を踏み外して転倒、足首をねんざ。

岡山市のクラレ岡山工場は安全確認のため、操業を一時停止した。合成繊維や樹脂の主力工場、自家発電機を手動で止めた。

大阪市営地下鉄が一時、徐行運転。同市内ではマンションのエレベーター内に女性(27)が閉じ込められたが、約40分後に救出。

警察庁が警備局長を長とする災害警備本部を設置。4500人の広域緊急援助隊の待機を指示。国土庁も情報対策室を設置。

<13:31>

東海道・山陽新幹線の浜松—徳山間で運転見合わせ。JR在来線も京阪神地区と中国地方のほぼ全域で運転を取りやめた。関西の大手私鉄は阪急と南海、阪神が全線で運転を一時ストップ。

<13:34>

広島市安佐南区のパチンコ店から「店内にいた40歳の男性が落ちてきた蛍光灯で顔をけがした」と119番通報。

<13:35>

首相官邸別館の危機管理センターに官邸対策室を設置。森喜朗首相は緊急参集チーム会議で「幸いにして大きな被害の報告はないが、未確認地域もあるので、引き続き情報収集にあたり、しっかりフォローしてほしい」と指示。

防衛庁で陸上幕僚監部が関係スタッフを招集。陸上自衛隊の偵察機LR1が大阪府八尾市の八尾空港を離陸する。

広島県警が1600人体制の災害警備本部を設置。

<13:37>

警察庁が警視庁と大阪、福岡府県警の広域緊急援助隊に待機を指示。

<13:38>

陸上自衛隊第3師団（兵庫県伊丹市）が全隊員を非常呼集。

<13:41>

消防庁が非常災害対策本部を設置。

<13:45>

警察庁が中国管区警察局を通じ、岡山県警を除く4県の広域緊急援助隊に出動を指示。岡山県警の隊は同県内で活動。

米子自動車道が点検のため通行止め。

本州四国連絡橋公団が瀬戸大橋を通行止め。1時間45分後に解除された。

<13:56>

東海道新幹線の京都―浜松間で運転再開。

<13:58>

JR在来線は京阪神地区で全線運転再開。ほかの地方でも山陽線の一部などで徐々に運転再開。

<13:59>

鳥取県の防災ヘリ「とっとり」が県西部上空へ緊急出動。

<14:00>

鳥取県米子市で開かれていた「介護保険推進全国サミット」が中止される。

関西大手私鉄が全線で運転再開。

<14:08>

鳥取県日野、日南両町の停電が復旧。

<14:10>

広島市消防航空隊のヘリが緊急救助隊として鳥取に出動。

<14:20>

滋賀、京都、大阪、兵庫、鳥取、広島、山口、香川、愛媛の9府県警のヘリコプター9機が上空から被害状況を確認。

<14:26>

広島市中区の女性(93)が柵から落ちてきた置物で側頭部に切り傷を負った、と家族から119番通報があった。

<14:29>

鳥取県知事が陸上自衛隊第8連隊(米子市)に災害派遣を要請。同連隊は被害状況を把握するため、偵察部隊を米子、境港両市に派遣。

<14:40>

森首相が片山善博・鳥取県知事に激励の電話。

<14:42>

東海道新幹線は東京―新大阪間の全線で運転を再開。

<14:50>

島根県の中海周辺の地域で液状化現象のため、道路が波打っているのが確認される。「数が多すぎて把握しきれていない」と同県警安来署。

<14:50>

エレベーター1800基を管理する日立ビルシステム岡山営業所は、エレベーター内に人が閉じこめられたケースなどの対応に追われた。「停止を知らせる信号が電話回線の混乱で伝わりにくく、全体状況は現段階でわからない」

<15:00>

防衛庁が災害対策会議を開く。

<15:00>

JR伯備線の生山―上菅間（鳥取県）で土砂崩れを確認。その後、伯備線、芸備線で次々と土砂崩れや落石が見つかる。

<15:05>

鳥取県の災害対策本部に「日野町濁谷の砂防工事現場で人が埋まった」「溝口町でも車が埋まっている」と報告が入る。テレビに日野郡内で土砂崩れのため寸断された道路やJR線が映し出された。

<15:10>

防衛庁で対策会議が始まる。虎島和夫長官が同庁幹部や陸海空各幕僚長らを前に「情報収集に努め、災害に積極的に対処するように」と述べる。

<15:15>

大阪管区气象台で横山博文・地震情報官が報道陣に最初の説明会。「阪神大震災以降、内陸部では最大の地震。震源地周辺は山陰の中では活動が多い地域だ。今後、震度6弱の余震が起きる可能性がある」と注意を呼びかける。

<15:26>

安藤忠夫・内閣危機管理監が首相官邸で記者会見。「震源地は山間部なので未確認地域は残っているが、大きな死傷者、事故の発生する見込みはないという見通しだ」

<15:26>

新幹線は東京―岡山間で運転を再開。

<15:30>

中国電力（広島市）が、鳥取県など3県で停電していた約1万7000戸の復旧工事が、すべて終わったと発表。

<16:00>

中川秀直官房長官が記者会見。「蓮実進・国土総括政務次官を現地に派遣するようにした」

<16:21>

鳥根県東部を震源とする余震が発生。鳥取県会見町では震度5弱。

<16:40>

松江市、震災第一体制から震災警戒体制に切り替える。

<18:09>

山陽新幹線が新大阪―博多間の全線で運転を再開。

鳥取県西部で震度6強 96人がけが

道路半分まではみ出して、倒壊した家屋＝6日午後3時15分、鳥取県米子市和田町で



6日午後1時半ごろ、中国地方を中心に強い地震があった。気象庁によると、鳥取県境港市で震度6強を観測したのをはじめ、岡山県北部や香川県東部で震度5強を観測するなど、西日本から関東にかけての広い範囲で揺れを感じた。

国内で震度6強を観測したのは1995年1月の阪神大震災（震度7）以来で、気象庁は「鳥取県西部地震」と名付けた。鳥取県の片山善博知事は午後2時29分、陸上自衛隊に災害派遣を要請した。政府も首相官邸に対策室を設置した。

朝日新聞社の調べでは7日午前1時現在、中・四国、近畿地方の1府8県で590棟の家屋が損壊し、96人がけがをした。東海道・山陽新幹線が一時運転を見合わせ、約19万人に影響が出たほか、米子空港は、滑走路に亀裂が入って閉鎖となった。鳥取県災害対策本部によると、米子市など県内で計2000人以上が避難所で夜を過ごしているという。

各地の震度



気象庁によると、震源は鳥取県米子市の南約20キロ、深さは約10キロ。地震の規模は、阪神大震災のマグニチュード（M）7・2を上回るM7・3と推定される。地震は北西―南東方向の断層が横ずれして発生した可能性が高いという。この断層は、これまでには知られていないもので、長さ約20キロか、それ以上とみている。

気象庁の観測では、その後も震度3以上の余震が頻発している。同庁は「M6以上の大きな余震が起こる可能性がある」と警戒を呼びかけている。

阪神大震災はM7・2で、6000人以上の死者が出た。今回の地震の規模はこれを上回るが、大阪管区気象台は「断層が地表に達していないため、阪神大震災のような強さの揺れにならなかったのでは」としている。東京大学地震研究所の解析によると、この地震のエネルギーの大きさは、阪神大震災の4割程度だった。

朝日新聞社のまとめによると、7日午前1時現在で1府8県で96人のけが人が確認された。鳥取県が64人と最も多く、次いで岡山13人、鳥根県8人、広島県と大阪府が各3人などとなっている。鳥取県では536棟の家屋が壊れ、鳥根県では36棟、岡山県では18棟がそれぞれ損壊した。

東海道・山陽新幹線は、岡山県倉敷市内など沿線計11カ所の地震計が揺れを感知したため、愛知県豊橋市から山口県岩国市にかけての約600キロの区間で、一斉に送電がストップした。午後6時過ぎには全線で運転を再開したが、上下57本が運休、240本が最大約4時間40分遅れ、約19万人の足が乱れた。

防衛庁と運輸省によると、航空自衛隊美保基地（米子空港）の滑走路を横断する格好で幅1センチ、長さ約45メートルの亀裂が2本入り、使用不能となった。鳥取、出雲（鳥根県）空港なども点検のため一時閉鎖されたが、いずれも異状は確認されず、解除された。

全日本空輸や日本エアシステムは7日以降、羽田―出雲、鳥取間に臨時便を運航する計画だ。

また、JR伯備線でレールの湾曲や根妻トンネルの一部崩壊などが確認されたほか、山陰線米子駅構内で機関車の脱線、芸備線の備後庄原駅付近で落石などがあった。

高速道路は中国、米子、岡山、浜田、山陽、高松、広島、阪和、瀬戸中央の各自動車道で計12区間が通行止めになった。

海上保安庁の調査では、境港の岸壁に亀裂や液状化現象、水道水圧低下が見つかった。鳥根県の御津漁港では防波堤の横ずれ、岡山県の宇野港フェリー岸壁の一部に沈下があったという。運輸省によると、地震による港湾施設の被害総額は約16億円。

また、鳥取、鳥根、岡山の3県で1万7000世帯以上が停電。厚生省によると、鳥取県内の2市8町、鳥根県内の4市5町などで水道施設への被害が出た。電話回線や携帯電話は中国、四国、近畿地方でつながりにくい状態が続いた。

朝日新聞（2000.10.7）

負傷者110人家屋損壊2000棟超



大地震で全壊した住宅はがれきの山となり、家人が壁などを掘り返して貴重品などを探していた＝7日午前10時10分、鳥取

阪神大震災後、最大の震度6強を記録した鳥取県西部地震は、朝日新聞社の7日正午現在のまとめで、中・四国、近畿地方の1府8県で負傷者が110人、家屋の損壊は鳥取、岡山、島根県で2118棟に上った。激しい揺れに見舞われた同県日野町などでは、計約3000人が避難所で不安な夜を過ごした。

余震は7日も続き、正午現在で計299回に達した。午前5時前にはマグニチュード(M)4.9の余震で、同県の日野、溝口両町では震度4を観測した。大阪管区気象台は引き続きM6以上の余震が発生する可能性があるとして、警戒を呼びかけている。

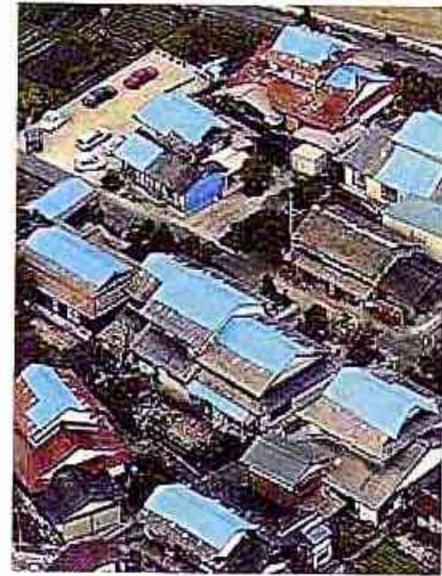
けが人は鳥取県が74人ともっとも多く、次いで岡山県17人、島根県8人、広島県、大阪府各3人、香川県2人など。鳥取県で1767棟、岡山県で300棟、島根県で51棟の家屋が壊れた。とくに日野町では全世帯の約7割に当たる約1000世帯が一部損壊以上の被害を受けた。同町は7日、県に仮設住宅の建設を要請した。

東海道・山陽新幹線は始発から通常運転を始めているが、鳥取県内などの伯備線は不通が続いている。JR東日本によると、東京と出雲市で7日夜発のサンライズ出雲号が上下とも運休する。米子空港は滑走路に約45メートルの亀裂が入って閉鎖されたままで、全日空は発着を鳥取空港に変更して臨時便を運航している。

朝日新聞（2000.10.8）

損壊5200棟、余震続く 気象庁は「今後、震度5弱も」

雨に備え壊れた屋根にシートをかけた家が目立った
＝7日午後4時50分、鳥取県日野町で、本社ヘリから



鳥取県西部地震は7日、同県西部や島根県東部で余震が断続的に発生した。震度4を4回、震度3を38回観測するなど、体を感じる余震は8日午前零時までに381回に達した。気象庁によると、余震は減少傾向にはあるが、活発な状態が続いているという。同庁は「今後も震度5弱以上の地震が発生するおそれがある」として、引き続き、壊れかけた建物の崩壊、がけ崩れなどへの注意を促している。鳥取、島根両県では、約2200人が避難所で不安な2日目の夜を迎えた。

気象庁によると、7日夕から3日以内にマグニチュード（M）5以上の余震が発生する確率は40%、M6以上は5%程度だという。また、8日昼前から9日明け方にかけて中国地方でまとまった雨が降る恐れがあるとして、地震で地盤が緩んでいる地域では、土砂災害に注意するよう呼びかけている。

被害は警察や行政の確認作業が進むにつれて拡大しており、8日午前1時現在、けが人は中国、四国、近畿地方の9府県で126人、損壊した家屋や公共施設などは軽微なものを含めて6県で5268棟にのぼった。

地震発生から1日以上たっても、避難所で不自由な生活を続けている住民は、7日午後9時現在、鳥取県内で2088人。島根県伯太町では同11時現在で153人になる。避難住民は、日中は自宅で過ごしても、夜になると避難所へ戻る人が多い。鳥取県日野町下榎の避難所にいた主婦（61）は「ゆっくり生活するためにも早く仮設住宅を」と話した。

ライフラインも完全復旧には至っていない。7日午後6時現在、鳥取県内では約790世帯で、岡山県内では約660世帯で断水が続いている。

土砂で線路が埋まったJR伯備線（岡山、鳥取県）の不通区間は8日も終日運休する。

一方、滑走路に亀裂が入り、閉鎖が続いていた米子空港では7日午後、運輸省や防衛施設庁の関係者が集まり、11日にも供用を再開する方針を固めた。6日夜から補修工事を進め、10日にも工事が完了する見通しが立ったという。

余震続発、復旧阻む避難いつまで 雨の被害心配

新たな土砂崩れがJR伯備線の線路や並行する国道181号をふさいだ。8日午後2時40分、鳥取県日野町貝原で、本社ヘリから



地震発生から3日目を迎えた鳥取県西部地方は8日も余震が断続的に発生し、9日午前1時までに、体を感じる地震は計511回に達した。この影響で、同県日野町のJR伯備線沿いの山林が崩れ、線路と、線路に並行する国道をふさいだ。負傷者はなかった。伯備線の全面復旧はさらにずれ込むことになる。

また、同日夜の余震で、県西部の西伯町で震度5弱が観測された。震度5弱は、発生日の6日にあった余震と同じ震度だが、地震の規模はマグニチュード(M)5.0で最大。鳥取、島根の両県では計約1700人が避難所で3度目の夜を過ごした。鳥取地方気象台は9日午前零時すぎ、鳥取県全域に大雨注意報を発令。雨模様の被災地では余震や降雨による2次災害も懸念され、自治体では警戒態勢を強めている。

8日午後8時51分ごろ、鳥取県西伯町で震度5弱を記録する余震があった。米子市、境港市、島根県安来市で震度4、鳥取県日野町でも震度3が観測された。震源は島根県東部。西伯町では午後9時すぎ、避難所を3カ所増やして計11カ所にするなど対応に追われた。

この余震の影響で、西伯町福成の避難所では、天井から照明器具が落下、避難していた全員が別の避難所に移った。

JR伯備線わきで山林が崩れたのは同日正午過ぎ。大量の土砂や倒木が線路を埋め、国道181号もふさいだ。伯備線の一部は8日も終日運休、復旧のめどは立っていない。けが人は9日午前1時現在、中国、四国、近畿の9府県で132人、損壊した家屋などは5410棟にのぼる。

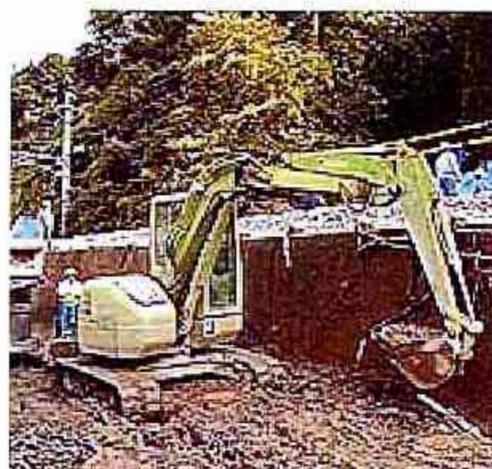
鳥取県は、大きな被害を受け災害救助法を適用されていた米子市と西伯、日野、溝口各町に加え、境港市と会見町に同法を適用することを8日決めた。適用日はいずれも6日。

また、8日午後1時17分ごろ、島根県東部を震源とする地震があり、同県大東町と斐川町で震度4を記録。気象庁によると、この地震は鳥取県西部地震の余震ではないが、震源に近い島根県横田町は、災害対策本部を再度設置した。

朝日新聞（2000.10.11）

J R 伯備線、運転再開地震発生から4日ぶり

伯備線の復旧作業にあたる作業員



J R 西日本は10日、鳥取県西部地震による土砂崩れなどのため一部で不通になっていた伯備線の伯耆大山―新郷間の復旧作業や点検を終え、午後1時13分出雲市発岡山行きの特急「スーパーやくも18号」から運転を再開した。同日中に、特急「やくも」など計33本を運行する。全面開通は、6日の地震発生以来4日ぶり。一部で徐行するため、いずれも到着が数分程度遅れる見込み。

山陽地方と日本海側を結ぶ同線は、6日午後の地震発生直後から不通になり、倉敷―新郷間での折り返し運転していた。

被害拡大、余震も相次ぐ

震度6強を記録した鳥取県西部大地震から一日たった七日も、県西部を中心に震度4の余震が相次いだ。被害は判明するのに従って拡大。懸命の復旧作業で、ライフラインや交通網などは持ち直し始めたが、住民が元の生活を取り戻すには、まだ時間がかかりそうだ。米子市と日野、西伯両町は六日深夜、災害援助法が適用された。余震はさらに続く可能性があり、県災害対策本部（本部長・片山善博知事）は、引き続き警戒を呼び掛けている。



鳥取地方気象台は七日、震度4の地震を三回観測した。有感地震は午後五時現在で百三十八回。六日からの合計は三百五十一回に上った。震度5以上の余震が発生する確率は、依然として四〇%程度という。

重軽傷者は境港市を中心に八十五人に増加。建物被害は合計約二千棟で、うち全半壊は境港市や日野町を中心に百二棟。西伯町や日野町、米子市などで、計約二千七百人が避難生活を余儀なくされている。

交通機関は、米子空港で滑走路の亀裂、JR伯備線で土砂崩れなどのため、復旧のめどが立っていない。道路は国道180号などで片側通行が続いている。

ライフラインでは電話、電気が完全復旧したが、西伯町三百八十世帯、日野町三百世帯など計七百九十世帯が断水している。

企業活動への影響も大きく、米子富士通などが点検のため操業停止。境港市昭和町の水産加工会社も被害状況を調べるため休業。一方、米子高島屋や境港やよいデパートなど、大型店は営業を再開した。

農業関係では、米子市彦名干拓地で液状化現象の影響で、ニンジンや大根の畑など約二十一ヘクタールで八千百万円相当の被害。境港市の弓ヶ浜干拓地や会見、岸本、淀江各町のナシ園でも被害が出た。

また大山町所子の国指定重要文化財「門脇家住宅」茶室の壁に亀裂が入ったほか、溝口町役場が建築技師の調査で危険と判定され、業務ができない状態になっている。

こうした被害を受け、扇千景国土庁長官（建設相）ら政府調査団や片山善博知事らが、現地入りして被災状況を視察した。

県は境港市の求めを受けて、自衛隊に災害派遣を要請。被災した各市町村に医師や保健婦を派遣し、健康相談やメンタルケアなどを実施している。市町村の要請で、水や毛布、弁当などの支援物資を送った。

鳥取県警は広域緊急援助隊の協力などを得て、余震被害を警戒している。

被災地ではボランティアの支援活動が始まり、県砂防ボランティア協会が、土砂災害危険箇所をパトロール。中国管区の女性警察官による「コスモス隊」が住民の困り事相談に乗った。県内各市町村の社会福祉協議会、鳥取大学工学部なども支援準備を整えている。

島根県内では県境付近の八束町や伯太町を中心に、家屋損壊が千九百棟を超えるなど被害が広がった。

県のまとめで、けが人は前日より二人増えて八人。家屋被害は八束町で新たに全壊二棟、半壊二棟。一部損壊は県東部十市町の一千九百八棟。

中海の中浦水門は、普通車に限定して通行可能になり、安来道路は復旧した。空の便は米子空港の閉鎖に伴い、出雲―東京―往復を臨時で増便した。

5. 地震工学に関する用語集

地震工学に関する用語集

1. 強震観測網 K-NET¹⁾

K-NET は、Kyoshin Net の略称である。平成7年兵庫県南部地震以後、地震学や地震工学に必要な強震記録を得るために、大規模な強震記録の観測ネットワークが幾つか構築されている。K-NET は、防災科学技術研究所によって全国展開された強震観測網である。K-NET では、広範囲の周期帯に渡って地震動加速度を精度良く記録できるデジタル式地震計（広ダイナミック・レンジの加速度型デジタル強震計）が、25kmメッシュ毎に1観測地点ずつ、できるだけ均等になるように全国1,000ヶ所に配置されている。K-NET の観測地点では、その地点の強震記録の特性を理解する為、土質調査が行われている。強震計は全て地表面上に設置され、最大2,000galの加速度記録を観測することができる。

全国1,000ヶ所に設置された強震計は、強震観測センターと電話回線で強震記録の転送が出来るシステムとなっている。このシステムは、地震発生時、気象衛星ひまわりの地震情報を観測センターで受信し、強震記録の回収動作から開始する。回収された強震記録は、強震観測センターで編集されてインターネット上で発信を行う。インターネット上の発信情報には、最大加速度の分布図、弾性波検層を含む観測地点の土質調査結果、強震記録の数値データ等がある。また、全国1,000ヶ所に設置された強震計は、地方自治体にも直結されており、地震発生時の即時的な対応を目指している。

2. 基盤強震観測網 KiK-net²⁾

KiK-net は、基盤面（工学的基盤面以上の固さを有する地盤面）上と地表面上に、広範囲の周期帯に渡って地震動加速度を精度良く記録できるデジタル式地震計を配置した強震観測網である。K-NET と同様に、防災科学技術研究所によって全国展開されたものである。

3. マグニチュード^{3), 4), 5)}

マグニチュードは、地下の断層運動である地震の規模を表す量である。1935年にチャールス・リヒターによって定義されたものである。リヒターによるマグニチュードの定義は、記録された地震波の最大震幅の常用対数を用いることであり、その後のさまざまなマグニチュードの定義の原点となっている。震源からの距離が同じであれば、地震波の震幅が1桁大きくなる毎に、マグニチュードが1ずつ大きくなるというのがマグニチュードの基本的な考えである。

リヒターは、カリフォルニアでおきる地震の大きさを決めるために、マグニチュードを定義した。カリフォルニアでおきる地震は、日本のような地中の深いところで起きる地震とは異なり、地表から約15kmまでの地核内でおきる地震である。また、全て内陸部で起きる地震であるため、震源と地震の観測地点は近いことが多い。カリフォルニアの浅い近地地震に対して定義されたリヒターのマグニチュードは、ローカルマグニチュード M_L とか、リヒターマグニチュードと呼ばれることがある。リヒター

が定義したマグニチュードは、次式で与えられる。

$$M_L = \log A + \log B \quad (3-1)$$

ここで、 A はウッド・アンダーソン型地震計（固有周期 0.8 秒，減衰定数 0.8，倍率 2800，水平動）の記録紙上最大片震幅（単位： μm ）で、 $\log B$ は震央距離 Δ （単位： km ）の関数である。

リヒターによるマグニチュードは、異なる地震計で観測された地震動や遠地地震および深い地震には用いることができないために、その後、カリフォルニアとは違う地学的環境や観測条件の下でも使えるように手が加えられて、表面波マグニチュード M_s （周期 20 秒付近の表面波の最大震幅から測る）、実体波マグニチュード m_B （実体波 P 波・S 波の最大震幅から測る）など数種類のマグニチュードが提案されている。我が国の気象庁で用いられている気象庁マグニチュード M_J は、表面波マグニチュードの 1 種である。表面波マグニチュード M_s 、実体波マグニチュード m_B 、気象庁マグニチュードの定義を以下に示す。

表面波マグニチュード M_s

$$\begin{aligned} M_s &= \log A + \log B \\ \log B &= 1.656 \log \Delta + 1.818 \end{aligned} \quad (3-2)$$

ここで、 A は周期 20 秒前後の表面波の地動最大片震幅（水平 2 成分を合成したもの，単位： μm ）， $\log B$ は震央距離 Δ （単位： $^\circ$ ）の関数で、上式は、 Δ が 15° から 130° の範囲にある場合を対象にした式である。現在、国際的に広く用いられている表面波マグニチュード M_s は、次式によるものである。

$$M_s = \log\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (3-3)$$

ここで、 T は表面波の周期（単位： sec ）である。この式は、震央距離 Δ が $20^\circ \sim 160^\circ$ の範囲について用いられる。上下の振幅を使うこともある。

式(3-2)は 1945 年に B.Gutenberg が、式(3-3)は 1962 年に Van ěk らによって提案されたものである。

実体波マグニチュード m_B

$$m_B = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Q(\Delta, h) \quad (3-4)$$

ここで、 A は実体波（P, PP, S）の主要動の地動最大片震幅（単位： μm ）， T はその周期（単位： sec ）である。 Q は震央距離 Δ と震源の深さ h の関数で、それぞれの実体波の上下動と水平動について、複雑なグラフによって示されている。式(3-4)も、やはり、1945 年に B.Gutenberg によって提案された式である。

気象庁マグニチュード M_J

以下に示す式を用いてできるだけ多くの観測点につき M_J を求め、平均をとる。た

だし、 $M_J > 5.5$ の地震では式 b)は用いない。

$h \leq 60\text{km}$ の場合

$$M_J = \log A + 1.73 \log \Delta - 0.83 \quad (3-5-a)$$

$$M_J = \log A_2 + 1.64 \log \Delta + \alpha \quad (3-5-b)$$

$h > 60\text{km}$ の場合

$$M_J = \log A + K(\Delta, h) \quad (3-5-c)$$

ここで、 h は震源深さ、 A は中周期変位型地震計による地動最大片震幅（水平動2成分合成，周期5秒以下，単位： μm ）， A_2 は短周期速度型地震計による最大地動速度震幅（上下動，単位： 10^{-3}cm/sec ）， Δ は震央距離（単位： km ）で、 α は地震計の特性補正項である。 $K(\Delta, h)$ は、テーブルで与えられる。

4. 地震動の表面波と実体波^{6), 7)}

地震波は、地中を伝わる実体波と地表面を伝わる表面波に分けられる。実体波は、P波とS波の二つに分けられる。

P波（縦波）は、速度（5～7km/sec）が一番速く、地震の時に最初にやってくる波で、通常ガタガタという感じで小刻みに揺れる。P波は、物の中に生じた疎密の状態（体積の変化）が移動していくもので、波の進行方向に振動しながら伝わる。P波は、固体・液体・気体のいずれの中でも伝わる。

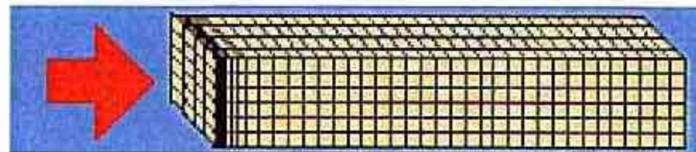


図 4-1 P波の動き⁶⁾

S波（横波）は、物の中に生じたねじれの状態（形の変化）が移動していくもので、波の進行方向に直行する面内に振動しながら伝わる。S波の速度（3～4km/sec）はP波の速度より遅く、地震の時にはP波より遅れてやってくる。S波の揺れは、P波よりややゆっくり大きく、ユサユサという感じで波の進行方向と直角方向に揺れる。

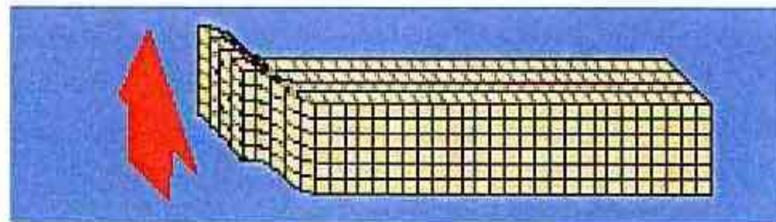


図 4-2 S波の動き⁶⁾

P波やS波が地球内部を三次元的に伝わるのに対して、表面波は、地球表面に沿って二次元的にちょうど海の波のように伝わる。海の波は、海面は大きく動くのに対して、海底に行くほどほとんど動いていません。表面波と呼ばれるように、この波によ

って振動するのは地球の表面近くの部分で、地下の深いところへの影響はごく小さい。地表面には、レイリー波とラブ波がある。レイリー波は、進行方向を含む鉛直面内で楕円軌道を描くように震動する。

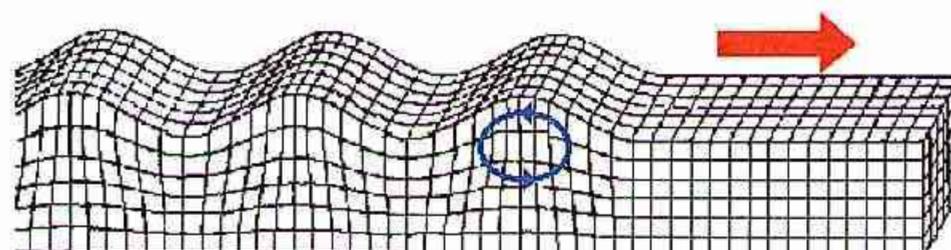


図 4-3 レイリー波の動き⁶⁾

ラブ波は、進行直交方向の水平面内でせん断震動する。

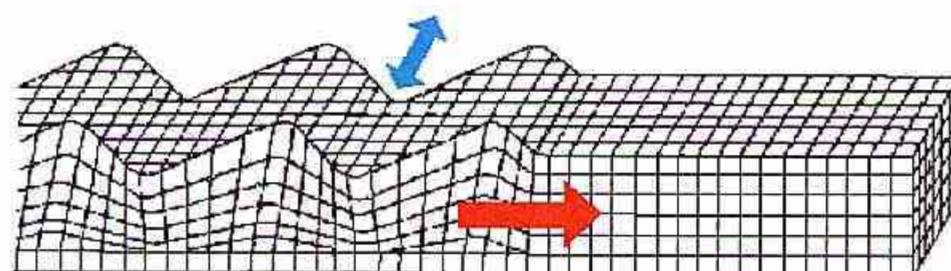


図 4-4 ラブ波の動き⁶⁾

5. 震源、震源深さ、震央、震央距離、震源距離⁷⁾

地震は、地球内部で起こった岩石の破壊による岩盤のずれによって、そこから地震波が発生する現象である。この破壊のきっかけになった地点を震源、震源の真上に相当する地点を震央という。震央から震源までの距離を震源深さ、震央から地震動の観測地点までの距離を震央距離、震源から地震動の観測地点までの距離を震源距離という。

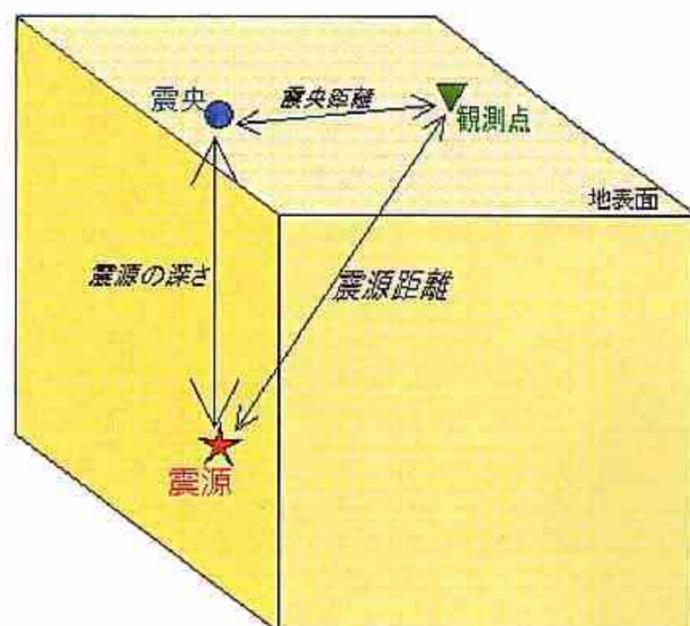


図 5-1 震源、震央、観測地点の関係⁷⁾

6. 断層（震源断層、地表地震断層）^{9), 10), 11)}

地下深くで起こる破壊を、地震と呼ぶ。地下深くで起こる硬い岩石の中での破壊はせん断型破壊であり、破壊面に沿って両側の壁が平行にすべるような破壊形態となる。この破壊面を震源断層と呼ぶ。地下にできる断層も、地震の規模が大きく震源が浅い場合には、地表に現れることがある。この地表に現れた震源断層を地表地震断層という。

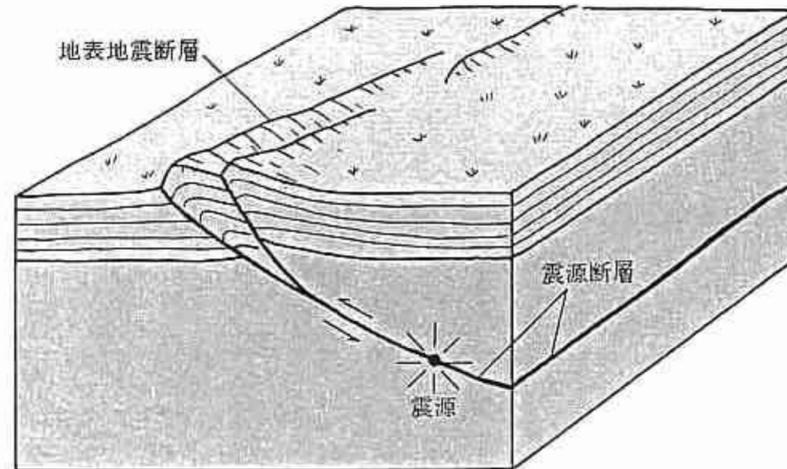


図 6-1 震源と震源断層および地表地震断層¹⁰⁾

地表地震断層としてその跡を残す地震は、震源が浅くて（深さ 20km 程度以浅）かつ地震の規模が大きい（マグニチュード 7 前後かそれ以上）地震である。図 6-2 は、1845 年から平成 7 年兵庫県南部地震以前に発生した地震のうち、その震源断層が地表に達したと思われる地震である。

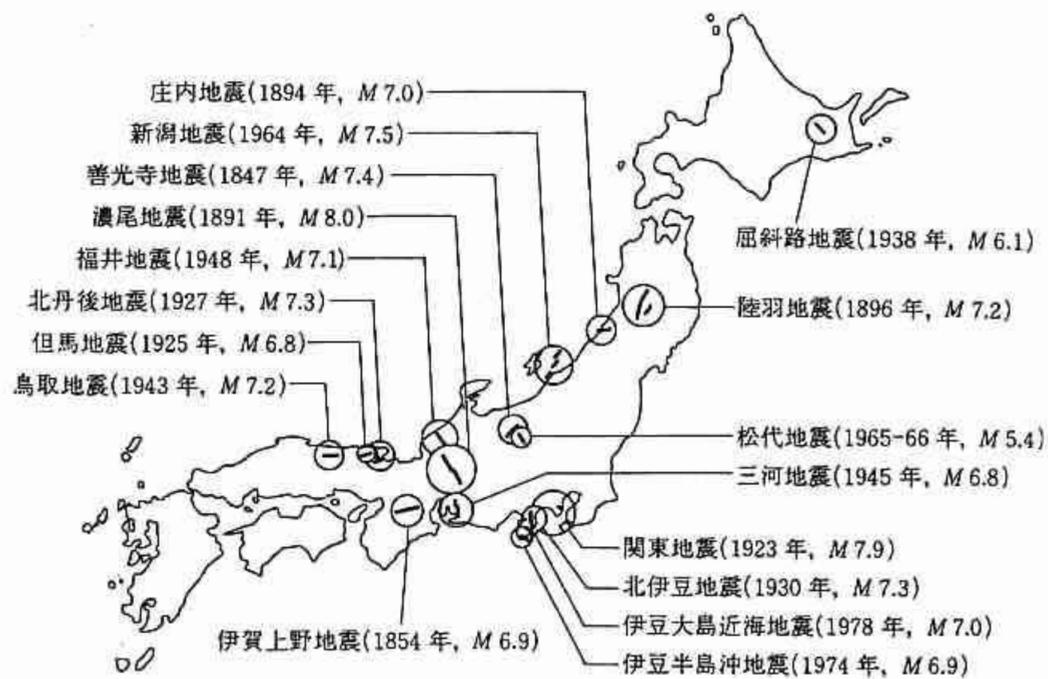
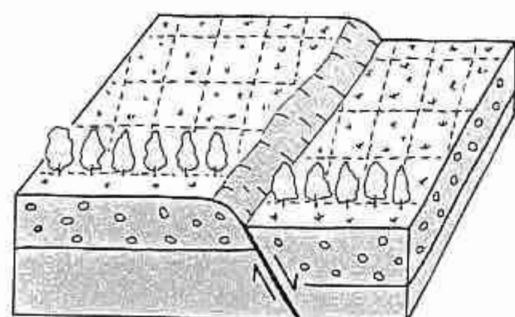


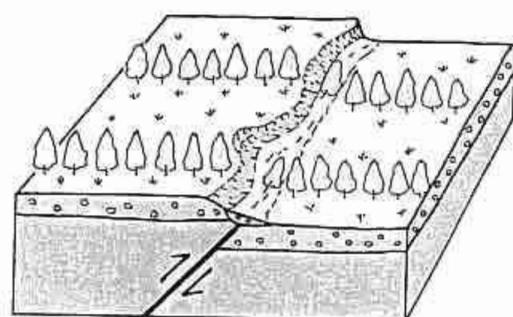
図 6-2 1845 年から平成 7 年兵庫県南部地震以前にその震源断層が地表面まで達した地震¹⁰⁾

断層は、それに沿って両側の岩盤がずれ動いた不連続面のことであるが、ずれの方
向により、縦ずれ断層と横ずれ断層に分けられる。縦ずれ断層は、正断層と逆断層に、
横ずれ断層は右横ずれ断層と左横ずれ断層に分けられる。実際の断層は、図 6-3 に示
すような純粹なものは稀で、縦ずれと横ずれが混じったものが多い。一般的に、逆断
層や横ずれ断層は水平に圧縮される力がかかっているところで、正断層は水平に引っ
張られる力がかかっているところで発生することが多い。日本付近では、プレートの

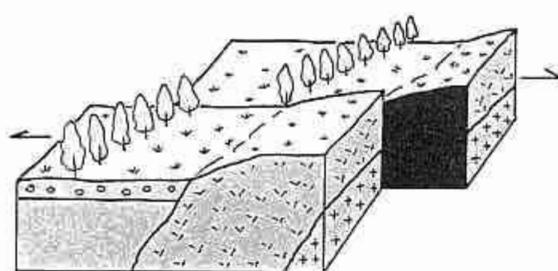
運動により圧縮されるような力を受けているので、逆断層や横ずれ断層がよくみられるが、別府-島原地溝帯では正断層がみられる。



(a) 正断層



(b) 逆断層



(c) 横ずれ断層

図 6-3 断層のずれ方向による分類¹⁰⁾

7. 断層パラメーター¹²⁾

断層面の空間的方位は、走向 θ 、傾斜角 δ 、食い違いの方向（すべり角） λ で表される。走向のかわりに断層面の傾斜方向を表示することもある。図 7-1 において、 $\lambda = 90^\circ$ と $\lambda = -90^\circ$ の場合を純粋な縦ずれ断層という。 $\lambda = 90^\circ$ の場合、断層面を境として相対的に上側のブロック（上盤）が上方へ、下側のブロック（下盤）が下方に動く。これが逆断層である。これとは逆の運動である $\lambda = -90^\circ$ の場合が正断層である。日本の太平洋岸におこる大地震のほとんどは $\delta = 10^\circ \sim 30^\circ$ の低角逆断層である。 $\lambda = 0^\circ$ の場合が左横ずれ断層、 $\lambda = 180^\circ$ の場合が右横ずれ断層である。日本では、内陸地震にこの型の断層がある。

断層面の大きさは、断層面を矩形で近似して、その長さ L と幅 W で表されることが多い。小さな地震では、断層面を円形で近似することもある。断層面上での食い違い U と断層面積 S の積に断層付近の媒質の剛性率を掛け合わせたものが地震モーメント M_0 である。地震モーメント M_0 は、断層運動全体の大きさを表す重要な物理量であ

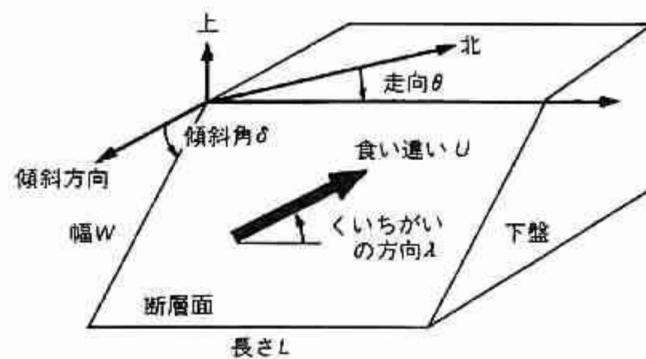


図 7-1 断層モデルと断層パラメータ¹²⁾

る。後述する、モーメントマグニチュード M_w も、地震モーメントから求められる。食い違い量 U は、一般に断層面にわたっての平均値がふつう用いられる。食い違いの大きさとその方向 λ をベクトルで表したものをスリップ・ベクトルという。

これらの断層パラメータは、以下のような方法によって推定される。

- ・) 力源モデルや食い違いモデルを基礎にして実体波や表面波の波形やスペクトル解析より求める。
- ・) 余震域の大きさを L や W の決定に用いる。
- ・) 地震波の解析から M_0 を求め、一方で余震域から S を推定し、両者から U を求める。
- ・) 海底の地震が津波を発生させた場合、津波の波源域を求め、それから S を推定する。
- ・) 陸に近い海底や内陸でおきた地震はしばしば陸上に地核変動を起こす。地核変動の様子は、測地測量や検潮儀観測などによってとらえられる。これらのデータと食い違いモデルを基礎にした静的弾性論から S や U を求める。

以上の断層パラメータは、地震前後の差に着目したもので静的なパラメータといえる。これに対して、断層形成中の運動を記述するものが動的パラメータである。食い違いの時間関数や破壊様式、応力解放過程を規定する量である。食い違いの立ち上がり時間 τ は食い違いに要した時間を表し、 U/τ は平均の食い違い速度を与える。破壊様式のパラメータは、破壊の仕方や破壊速度などで与えられる。動的パラメータの推定は、主として地震波の解析に基づくが、静的パラメータの決定ほど容易ではない。これまでの研究から、平均食い違い時間は 1m/sec 程度、破壊速度は S 波速度の $0.7\sim 0.8$ 倍程度 (約 $2\sim 4\text{km/sec}$) といわれている。破壊が断層面上のどこで発生し、どのように広がったかは、本震の位置と余震分布からおおよその推定ができる。

我が国で起きた地震の断層パラメータを体系的に整理した、「日本の地震断層パラメータ・ハンドブック」における断層パラメータの定義を以下に示す。

断層面の位置 N, E, d

図 7-2 に示すように、断層面を手前に傾き下がるように置いた場合、左上に位置する端点を断層面基準点と定め、その緯度、経度および深さを示す。

断層面の向きと食い違いの方向 θ , δ , λ

θ は走向方向 (図 7-2 のように断層面を置いた場合の右手方向) を北より東回りに測った角度, δ は断層面の傾き角, λ は上盤の下盤に対する食い違い方向を断層面上で走向方向より反時計回りに測った角度で定義する。

断層面の大きさと食い違い量 L , W , U

L は走向方向の長さ, W は傾斜方向の長さ (幅), U は食い違い量を示す。

食い違いの時間経過を表す震源関数の立ち上がり時間 τ

図 7-2 に示すように, 食い違い量が 0 から U に達するまでの時間を示す。

破壊の伝播速度 V_{rup}

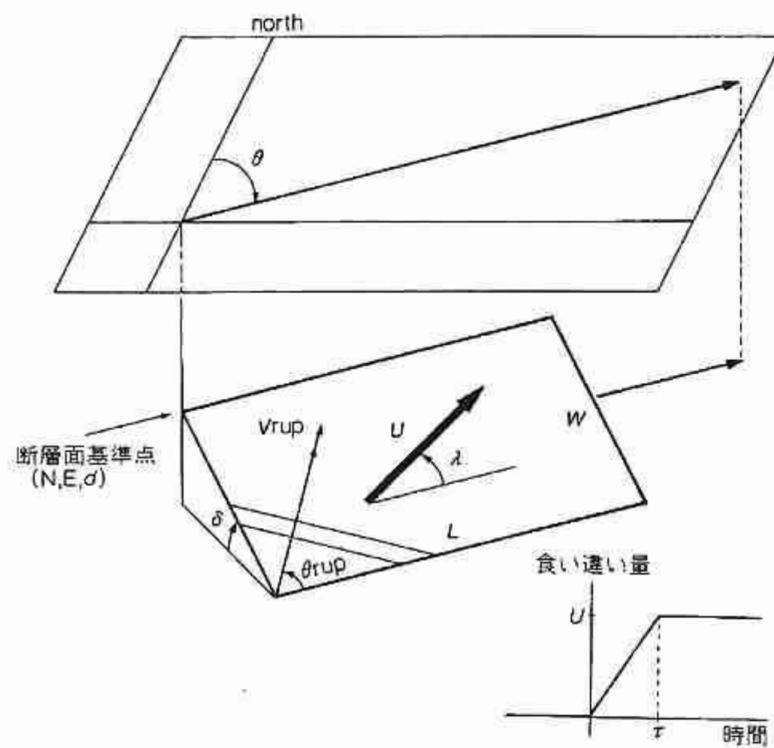


図 7-2 断層パラメーター¹²⁾

破壊の伝播様式 (図 7-3 参照)

UL unilateral 断層面の走向または傾き方向に平行して, 1 方向のみに伝播する。

BL bilateral 断層面の走向または傾き方向に平行して, 互いに逆向きの 2 方向に伝播する。

BD bidirectional 断層面の走向または傾き方向に斜交して, 1 方向または多方向に伝播する。

RD radial 1 点から放射状に伝播する。

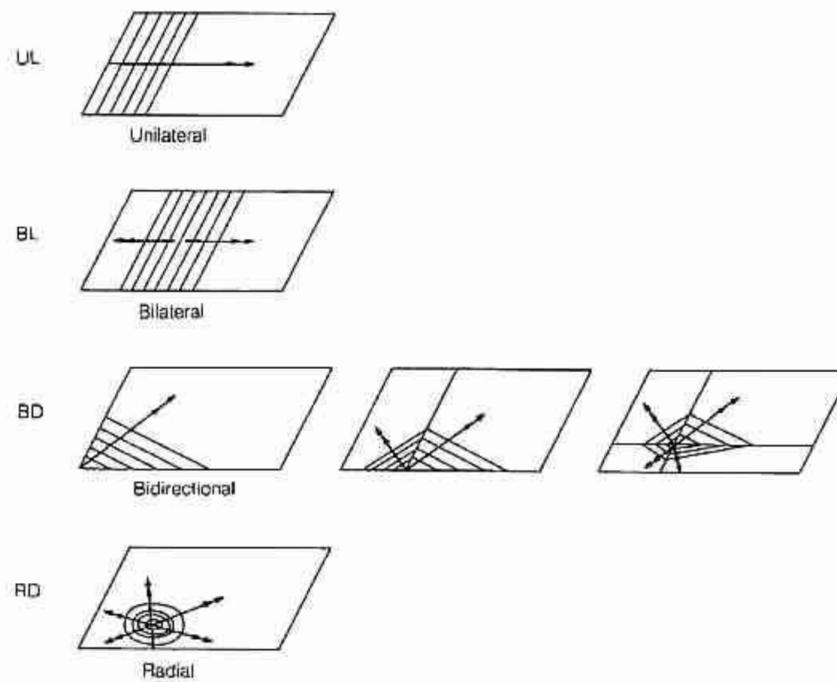


図 7-3 破壊伝播様式の定義¹²⁾

8. モーメントマグニチュード^{13), 14)}

地震は断層が動くことによって起こるため、地震の大小は、地震をおこした断層の面積の大小によって決まるといえる。マグニチュードは、震央からの距離とそこで観測される地震動の最大震幅で定義されると述べたが、マグニチュードを決める地震動の震幅は、断層面の大きさがある程度大きくなると、たとえ断層面の大きさに大差があっても、それほど差異が現れない。このため、大きな地震では、地震動の震幅の大きさだけでは、地震を引き起こすもととなった断層の大きさを表すことができない。そこで、図 8-1 に示すように、地震波の震幅の大小よりもその断層を境にして岩盤をずり動かすために働いた力（地震モーメント）の大小で地震の大きさの大小を表すことが地震学の分野では行われている。これをモーメントマグニチュードという。図中に記された岩の固さ（剛性率） μ は、地核内で発生する地震の場合 $\mu = 3.3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ 程度である¹⁵⁾。

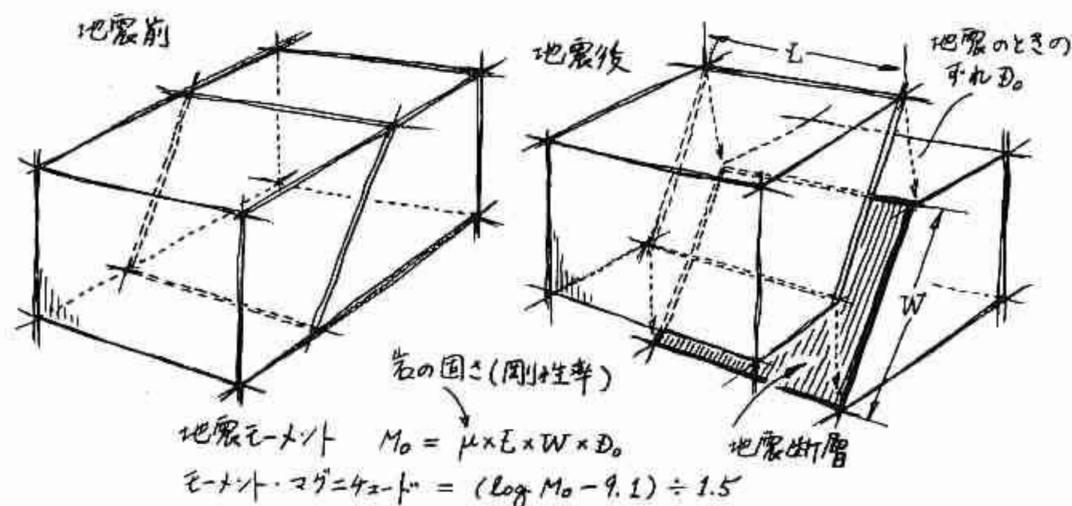


図 8-1 断層の大きさを表すマグニチュード(モーメント・マグニチュード)の概念¹³⁾

モーメントマグニチュードは、1977年にカリフォルニア工科大学地震研究所の金森博雄教授によって提唱されたもので、地震モーメント M_0 とモーメントマグニチュード M_w の関係を次式で与えている。³⁾

$$M_w = \frac{(\log M_0 - 9.1)}{1.5} \quad (8-1)$$

9. 震源メカニズム解

地表で観測される地震波の揺れの向きや大きさの分布は、断層の型がどうであったかによって異なってくる。このため、地震波の揺れの分布を調べることで、震源での断層の動き、発震機構を知ることができる。このように観測された地震動を用いて求めた断層の動きを震源メカニズム解という。やや専門的となるが、震源メカニズム解を求める幾つかの方法の概要¹⁶⁾を以下に示す。

非常に簡便で、従来から用いられている方法として、P波初動の押し引き分布からメカニズム解を求める方法があげられる。この方法では、精度良くメカニズム解を推定するには震源球面上に均一に分布する多数の観測点が必要となる。小地震では十分な押し引き点数を得ることは難しく、また、海域で発生した地震の場合は、観測点の分布が片寄ってしまうためP波初動の押し引きのみで精度の高いメカニズム解を決定することは困難である。

S波の振動方向を用いて発震機構を推定する研究もなされている。しかし、地表への入射角が臨界角を越えるとSV波の位相が変化するため、入射角が臨界角を越える地震波を用いてS波の偏りの角を正確に測定することは困難である。つまり、この方法は観測点の広がり的大小に対して震源が十分に深い地震でないと適用は難しい。S波の偏りの角は地震波の伝播経路における媒質の異方性の影響を受けることも問題であるが、異方性が存在する場合でも、その補正を行うことによってメカニズム解を求める手法も考案されている。

1970年代後半から、デジタル記録方式の広帯域地震計による全地球的な観測網が設置されたことに伴い、長周期地震波の観測波形からインバージョン法を用いることによりモーメントテンソル解を求める手法が開発され数多くの研究に使用されている。これは、基本的には震源時間関数を仮定しグリーン関数をコンボリューションすることで各観測点における合成波形を作り、観測波形との残差が最小になるようにモーメントテンソル解を求める方法である。モーメントテンソルインバージョンは、

-) 単純な構造による表面波インバージョン法
-) 遠方近似により Haskell(1969)の方法を用いてグリーン関数を求めてそれを使用する実体波インバージョン法
-) 波数積分により厳密解を求める方法
-) モードの重ね合わせによりセントロイドの位置も同時に推定する CMT インバージョンによる計算法

の4種類に大きく分けられる。また、震源時間関数を精度良く求めるために、

-) 小地震の記録を地震の大きさの違いを考慮して補正した経験的グリーン関数を使

用する方法

- ・) 各基底解毎の震源時間関数を同時に求める方法も開発されている。

10. 震源球面とメカニズム解

各観測地点の地震計が記録する地震波は、いろいろな因子の影響を受け、複雑な波形をしているが、P波は縦波であるから、ある観測地点にP波が到着したとき、それによる地面の最初の動き（初動）は、震源から遠ざかる向きすなわち押しか、震源に近づく向き引きのいずれかである。

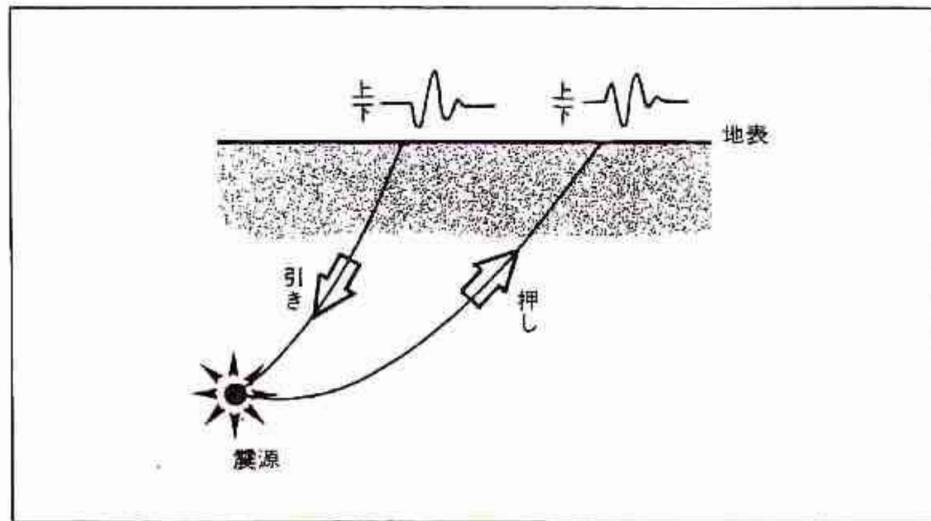


図 10-1 P波初動の押し引き分布（その1）¹⁷⁾

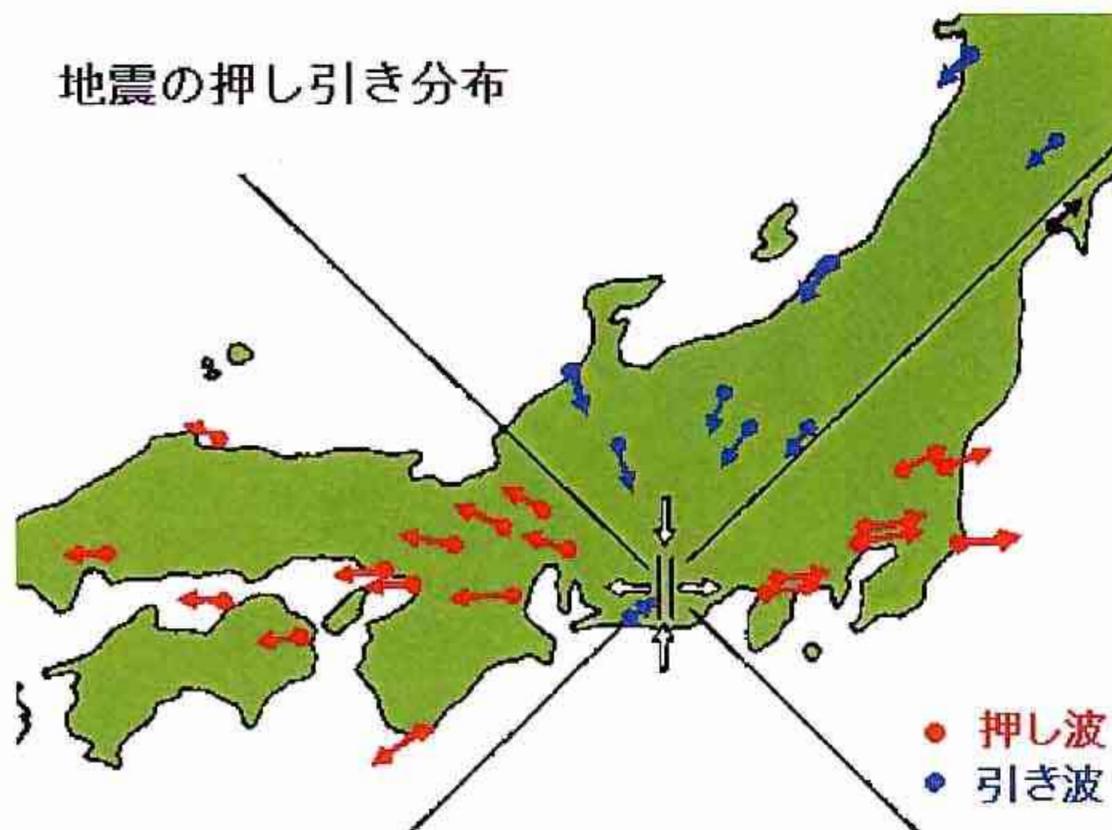
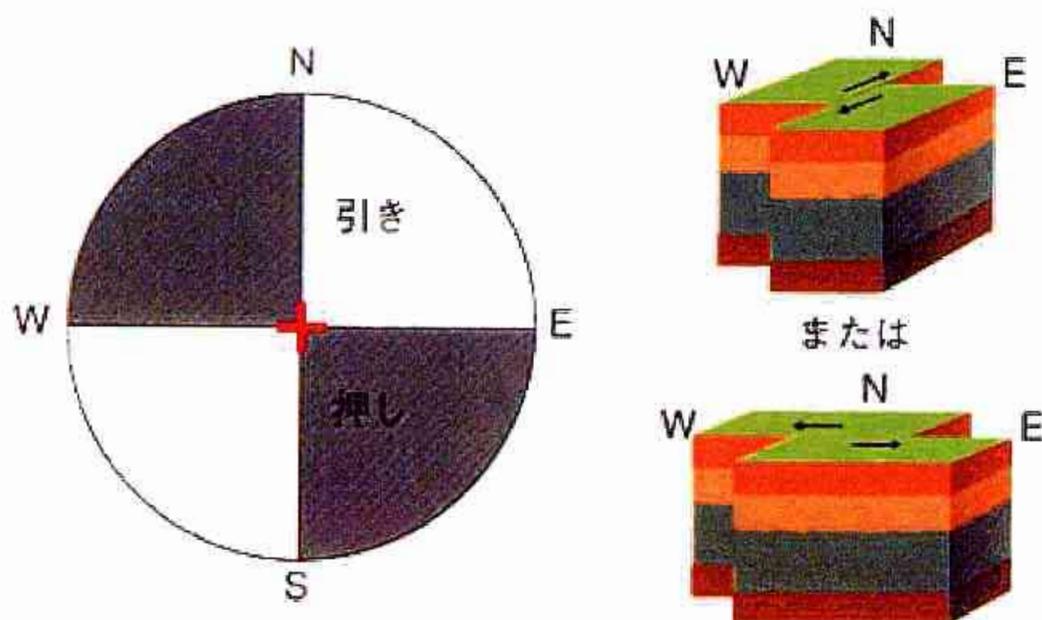


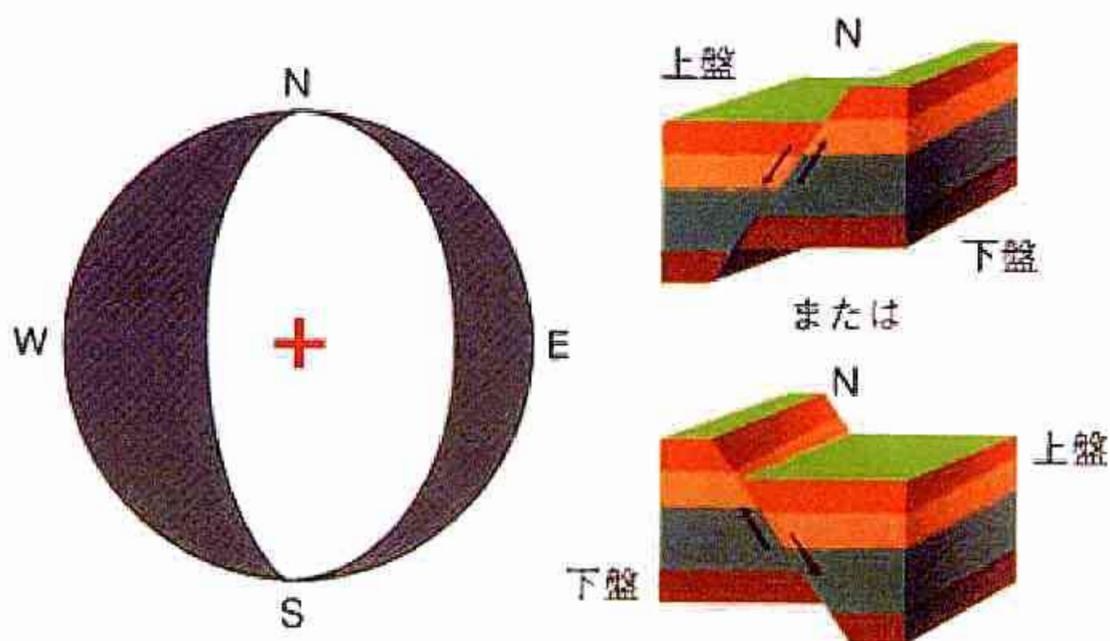
図 10-2 P波初動の押し引き分布（その2）¹⁸⁾

このP波の初動分布は、震源球と呼ばれる震源からの一定距離の仮想的な球の上に

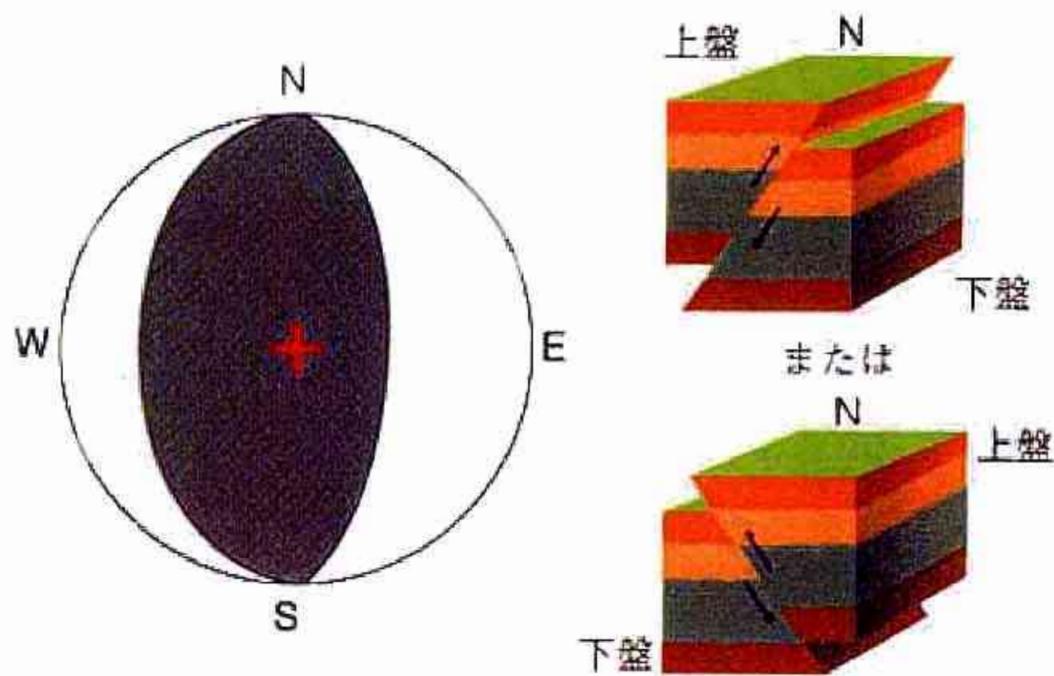
引き戻して表すとわかりやすい。断層運動によるP波の最初の揺れの向きを震源球の上でみると、押しと引きの領域が2つの直交する面を境にして交互に現れる4象限型と呼ばれる分布をする。この直交する面はP波節面と呼ばれ、このうちの一方が断層のすべり面と平行になっている。一般に、震源球を水平面上に投影し、メカニズム解として表示する。発震機構解は地震の断層のタイプと、そこに働いた力の状態を表している。図10-3～図10-5に、横ずれ断層、正断層、逆断層の例を示す。



押し引きの境界を示す線が円の中心付近で交差すれば横ずれ断層
 図10-3 北東-南西圧縮の横ずれ断層の例¹⁹⁾



円の中心付近が引きの領域であれば縦ずれ正断層
 図10-4 東西引張の正断層の例¹⁹⁾



円の中心付近が押し領域であれば縦ずれ逆断層
 図 10-5 東西圧縮の逆断層の例¹⁹⁾

11. 震源時間関数

地震モーメントの時間微分 $\dot{M}_0(t)$ はモーメントレート関数と呼ばれ、震源における運動の時間的変化を表す。 $\dot{M}_0(t) = M_0 \cdot f(t)$ と書き $f(t)$ を震源時間関数と呼ぶ。 $\dot{M}_0(t)$ そのものを震源時間関数と呼ぶこともある。²⁰⁾

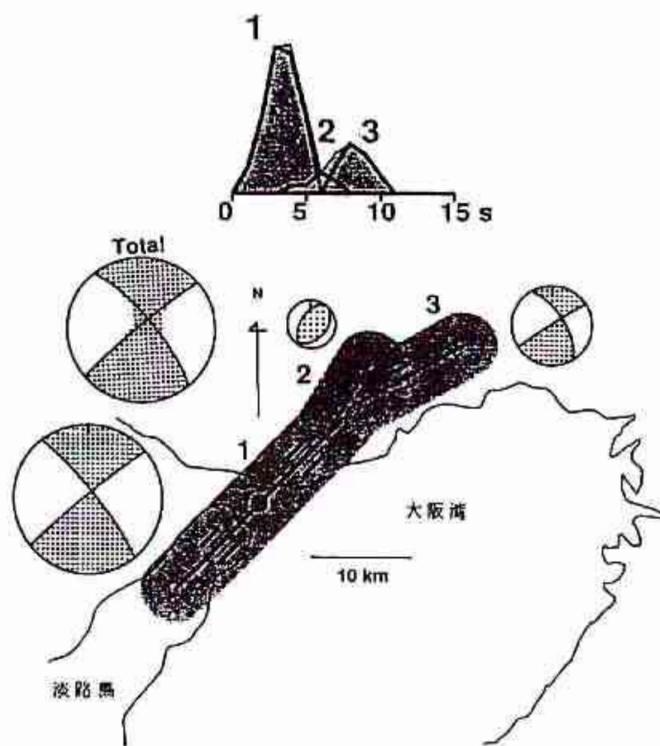


図 11-1 平成 7 年兵庫県南部地震による震源時間関数²¹⁾

図 11-1 は、平成 7 年兵庫県南部地震の震源時間関数である。震源時間関数から、平成 7 年兵庫県南部地震は、それぞれ約 5 秒の継続時間を持つ 3 つのサブイベントからなり、全体でわずか 10 秒間あまりの間に地震が終了していることがわかる。

12. 余震域・余震分布²²⁾

余震が発生する範囲は、空間的な広がりがあり、その範囲を余震域という。本震直後の余震域は、本震で断層が食い違った領域にほぼ等しいため、余震の震源特に、本震直後の余震の震源分布を精度良くかつ詳細に決定することは、本震の震源断層の範囲や位置を知る最も有効な手段の 1 つである。

図 12-1 は、平成 7 年兵庫県南部地震における 1995.1.17,00:00~1.27,09:00 における余震の震央分布と余震活動である。

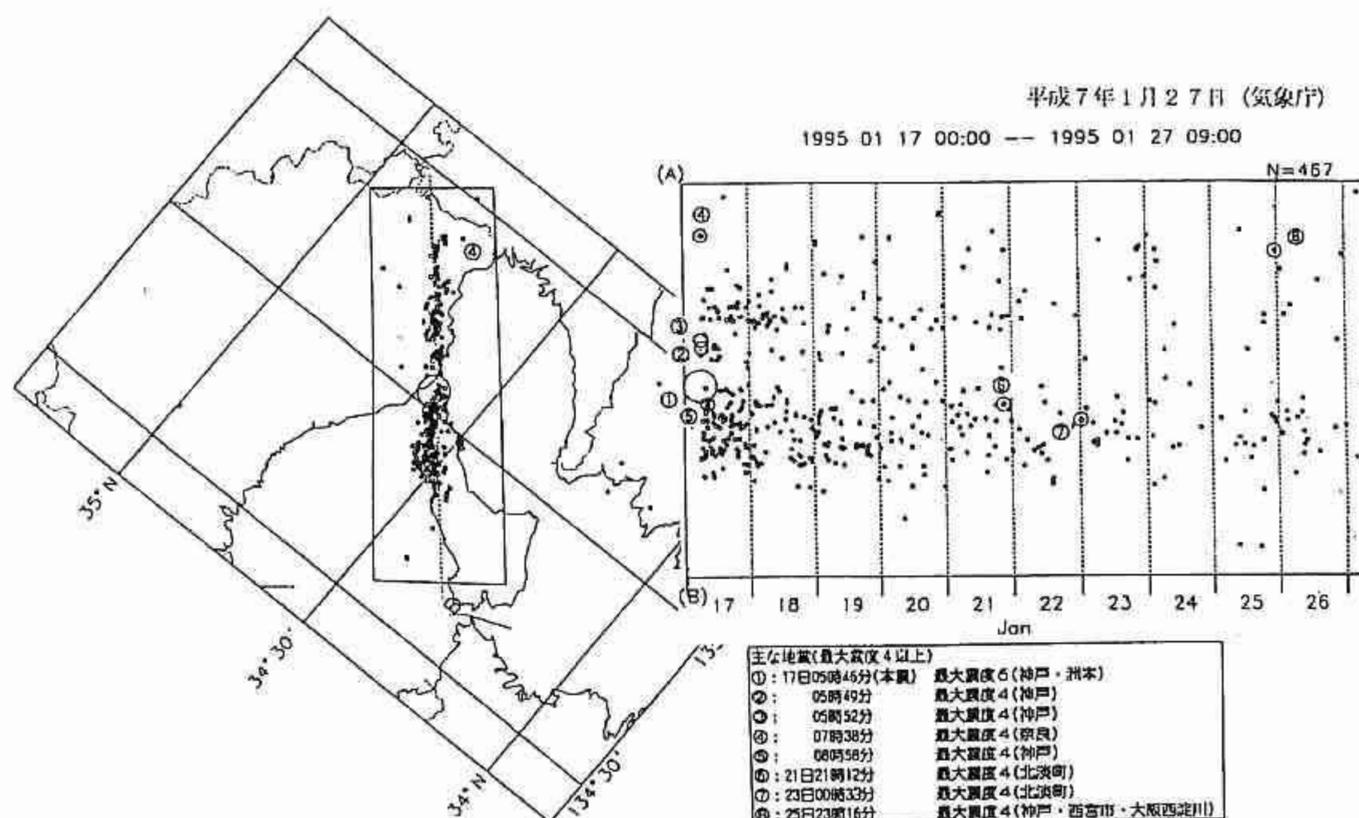


図 12-1 平成 7 年兵庫県南部地震における 1995.1.17~1.27 までの余震域²³⁾

13. 墓石の転倒²⁴⁾

墓石の高さを H cm, 幅を B cm, 重量を W kgf とする。今、地表面が最大加速度 α gal の加速度で震動したとする。この最大加速度と重力加速度の $1g$ (980gal) との比率は、次式で与えられる。

$$k = \frac{\alpha}{g} \quad \text{or} \quad \alpha = k \cdot g \quad (13-1)$$

このような地震動の加速度と重力加速度との比 k が震度である。図 13-1 に示す墓石にはその重量 W の k 倍, $k \cdot W$ kgf の水平力が働くことになる。これは、図 13-1 に示すように、墓石の重心 G に綱をつけて、図の矢印方向に $k \cdot W$ kgf の力で水平に引っ張ったことに相当する。また、墓石は、地球の中心に向かって W kgf の力で引っ張られ

ていることになる。地震時にすわりの良いどっしりとした墓石は少々の加速度では倒れることはないが、背の高い細目の墓石は少しの加速度でも倒れやすい。墓石の幅と高さを測って、綱引きの勝敗を考えると、墓石が倒れるか倒れないかの境目にある震度は、次式で与えられる。

$$k = \frac{B}{H} \quad (13-2)$$

この式を、ウェストの公式と呼ぶ。強震計が開発される前や地震計が設置されていないところに生じた加速度は、式(13-2)を用いて推定してきた。

一般に、墓地にある墓石の数は多いため、測定結果を統計的に処理すれば、地震動の最大加速度のおおよその見当は付けられる。また、墓石ほど簡単な形をした物体は、少なく、何よりも、全国いたるところに、ほぼ同一のプロポーシヨンのものがほとんど無数にある。

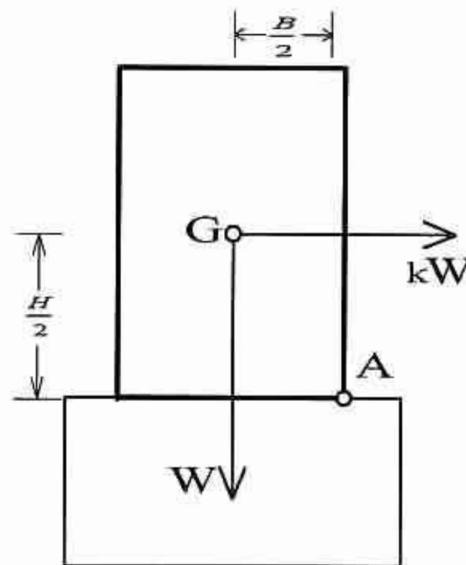


図 13-1 墓石に作用する水平力と重力の関係²⁴⁾

14. 地震基盤，工学的基盤²⁵⁾

地震動は地下数キロにある硬い岩盤から地表に向かって伝わる際に、地表付近の地盤や地形によって屈折，反射を繰り返す，場所により，焦点効果と呼ばれるような揺れの集中が起こったり，揺れが伝わらないところがあったりする。このため，地震動は観測する場所によって大きく異なることになる。しかし，地中の深いところでは，地震動はそれほど急変するわけではない。ある広い範囲に渡って地震動がおおむね一定とみなせる硬い地盤，これが地震基盤である。図 14-1 は，地震基盤，工学的基盤および解放基盤の関係を模式的に示したものである。

地震基盤は，地震を起こす硬い岩盤（地核）の最上層に設定されるのが一般で，古い地質年代の非常に硬い岩盤や花崗岩類などを指すことが多く，地核の最上層がこれに相当し，せん断弾性波速度 V_s は 3000m/sec 程度となる。地震基盤は，山間部では浅く，平野部では深い傾向にあり，東京湾周辺では地下数 km に存在する。このため，耐震設計で入力地震動の設定位置を地震基盤とするためには，大規模な地盤調査が必要となり，実際には，地震基盤で入力地震動を設定することはほとんど行われていな

い。

地震動は、地表面近くの地盤（表層地盤）の影響を受けて大きく変化するため、水平面方向への対象範囲を狭めると地震動の性質がおおむね一定とみなせる硬い地盤は、地震基盤よりも浅いところに設定することができる。具体的には、構造物の基礎構造物を支持する支持層等がこれに相当し、せん断弾性波速度 V_s が400~300m/sec程度以上となる地盤である。これを、工学的基盤という。工学的基盤面で想定される入射波が、それよりも深部の地下構造の影響を正しく反映したものであれば、工学的基盤は妥当なものとなる。

図14-1には、解放基盤も示してある。解放基盤は、原子力発電所の入力地震動を設定するために定義される硬い地盤面であり、今からおよそ200万年以前の第三紀といわれる地質年代か、それよりも古い年代に形成された硬い岩盤を指す。

なお、入力地震動を基盤面位置で定義する場合、基盤面が地表に露出しているとみなして、その地表面上で入力地震動を定義することが行われる。その際、地表に露出している基盤面を路頭基盤面とか、解放基盤面ということがあり、図14-1に示す解放基盤とは異なるので注意を要する。

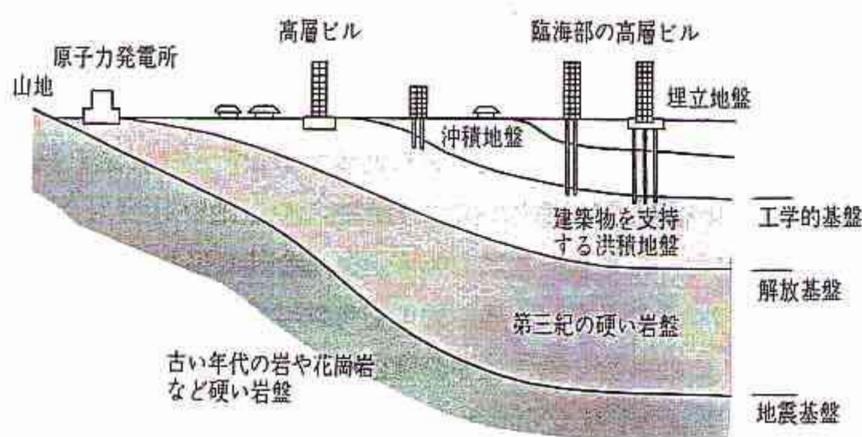


図14-1 地震基盤・解放基盤・工学的基盤の概念図²⁵⁾

15. 強震計による地震観測^{26), 27)}

大地震時の強震地動や構造物の挙動を確実に記録することのできる加速度強震計開発の強い要望から、1951年に「標準強震計試作委員会」が組織された。その直接的な経緯は、1948年の福井地震であるといわれている。1953年に「SMAC」型地震計が試作され、1960年に「DC」型（建設省型の英語略）強震計が製作されている。土木構造物を対象とした本格的な地震動の観測は、建築分野よりは少し遅れており、1964年の新潟地震を契機としている。強震計は、その必要性が広く認識されていくとともに設置台数は増加した。

SMAC型強震計が開発され、多くの強震動記録が集積されて、超高層建築物や長大橋梁等の実現とその動的解析技術の検証や、地震被害と強震動の関係の研究等、耐震

工学の向上に果たしてきた役割は極めて大きい。しかし、設置台数の増加、集積された強震記録の活用・利用分野が拡大されてくると、より良い活用を目指して、SMAC型強震計が持つ様々な問題点が指摘されるようになった。SMAC型強震計は、強震計の記録の上限が1gを目標に設計されている。強震計のダイナミックレンジは概ね40dBであるため、およそ20gal以下の小さな加速度震幅を記録することができない。たとえば、加速度波形に含まれる長周期成分がそれに相当する。また、SMAC型の振り子の固有振動数は低いため、高い振動数成分に対する応答が小さい。このような特性を有するSMAC型強震計では、長周期成分と短周期成分を精度良く記録できないことになる。例えば、国土交通省土木研究所では、SAMAC型強震計で観測された地震動のうち、その統計解析の範囲を周期0.083秒～3.0秒の地震動としている。

IC技術の進歩に伴い、SMAC型強震計もデジタル式地震計にとってかわられるようになった。デジタル式地震計は、広い周期帯に渡って短・長周期地震動を精度良く記録できること、0.1gal～2000galという小さな震幅から大きな震幅までを精度良く記録できること、そして、一度記録紙に記録されたアナログ記録を、多くは人力によって数値化しなければならないSMAC型強震計と異なり、数値化の誤差を伴わないという点で優れている。また、デジタル式地震計の普及は、耐震工学に一つの問題を投げかけた。1993.1.15平成5年釧路沖地震の釧路気象台記録は約920galという大きな最大加速度が観測されたにもかかわらず、その被害が小さいことが指摘されている。これは、SMAC型強震計では精度良く記録できなかった短周期成分をデジタル式地震計では精度良く記録できること、加速度の大きさは短周期成分の大小の影響を受けることで説明できる。デジタル式地震計で記録される加速度波形の最大加速度は、加速度波形に含まれる短周期成分の影響が大きいため、その値は、構造物に与える影響を十分反映したものとなっていない。このような状況下では、最大加速度は単なる1次情報であり参考値である。構造物への影響や被災状況と地震動の関係を説明するには、応答スペクトルやSI値のように応答スペクトルを平均化した量が用いられることが多い。また、現在のコンピュータ技術のめざましい進歩は、デジタル式地震計で記録された地震動記録から、その応答スペクトルやSI値を瞬時に算出してくれる。同様に、コンピューターネットワークの進歩は、デジタル式地震計で観測された地震動を、瞬時に、世界の様々な地域に配信するという世界を実現している。

16. 断層近傍における地震動²⁸⁾

断層には2つの向かい合う力(偶力)が作用している。断層が滑ったとき、周りの変位は方向によって反対向きや0になる。図16-1は、力の向きが水平方向の場合における、S波のパターンを示す。これをラジエーションパターンと呼ぶ。断層の線上では断層に直交する方向に大きな変位となる。長い断層は一瞬で破壊する訳ではなく、破壊開始点にあたる震源から逐次壊れていく。そのとき、破壊が進む方向では震幅が大きくなり、破壊が遠ざかる方向では震幅が大きくなりにくい。図16-2は、断層面を3つの小領域に分割し、断層の破壊が進む方向と断層の破壊が遠ざかる方向に生じる地震動の特性を模式的に表したものである。小領域からの波が時間差を持って重なると、破壊が進む方向では揺れている時間は短いが震幅が大きくなり、破壊が遠ざかる

方向では揺れている時間は間延びするが、震幅は大きくなりにくい。このような断層運動の伝播方向に依存した地震動の増幅は電波と同様に、指向性 (directivity) と呼ばれ、カリフォルニアで観測される地震動のように震源断層近傍の地震動によくみられる。さらに破壊が移動する場合、ラジエーションパターンにも指向性がみられる。図 16-3 は、右横ずれ断層における指向性を模式的に示したものである。図の(a)では、小さな断層では最大速度震幅部分の震動方向が 4 象限型の方位特性をもっている。しかし、図の(b)では、断層が大きさをもち、その破壊が左から右へ進行するとき、断層半ばから右側を中心に全体的に断層直交方向の震動が卓越している様子がわかる。図の(c)は、震動が卓越した断層直交方向に着目したものであり、断層各部から生じた地震動が増幅的に干渉し、その結果、地震動が長周期のパルス状となっている。

図 16-4 は、平成 7 年兵庫県南部地震における断層と地震動速度波形の粒子軌跡を表したものである。震央からみれば、神戸周辺は断層の破壊が進む方向に位置している。断層に直交する方向で震幅が大きくなっていることがわかる。図 16-5 は、平成 12 年鳥取県西部地震に対して描いた断層と速度波形の粒子軌跡である。やはり断層の破壊が進む南東方向では、断層に直交する方向で震幅が大きくなっている。

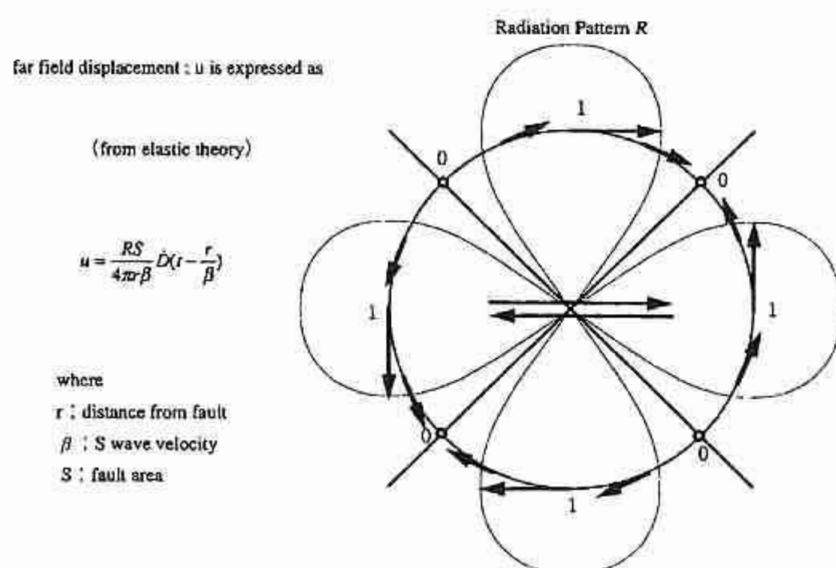


図 16-1 断層に水平方向の偶力が作用するときの S 波のラジエーションパターン 28)

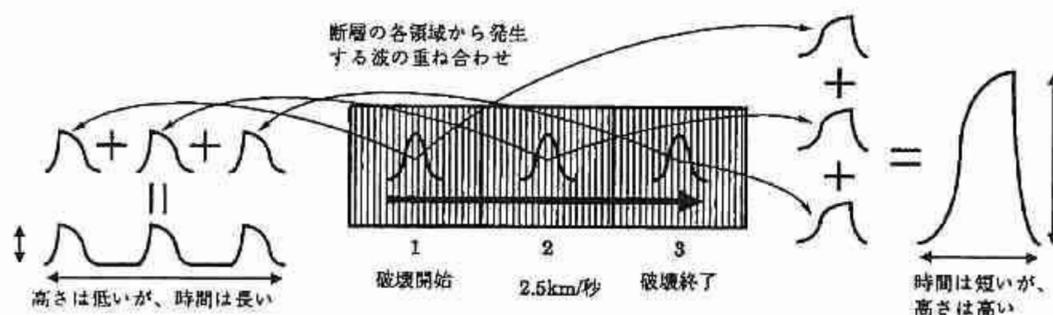


図 16-2 断層運動の伝播方向に依存した地震動の増幅 (指向性の概念図) 28)

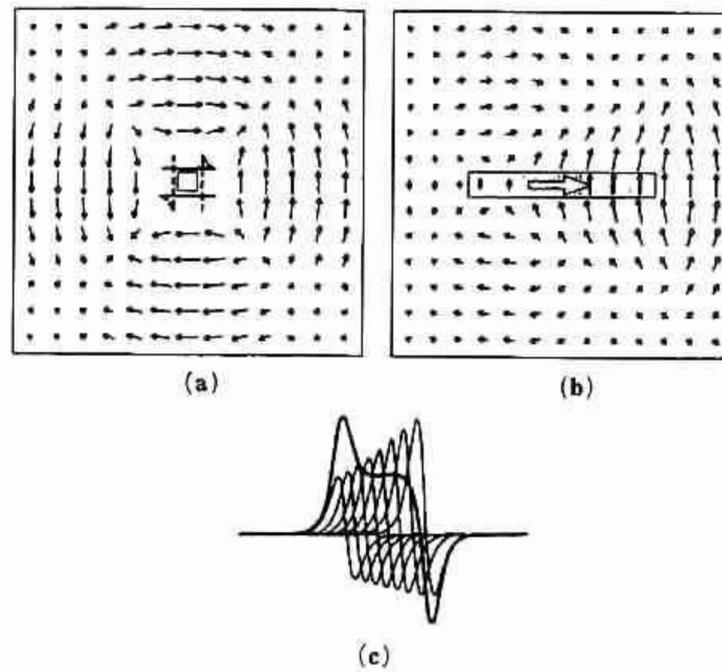


図 16-3 右横ずれ断層における指向性の概念図²⁹⁾

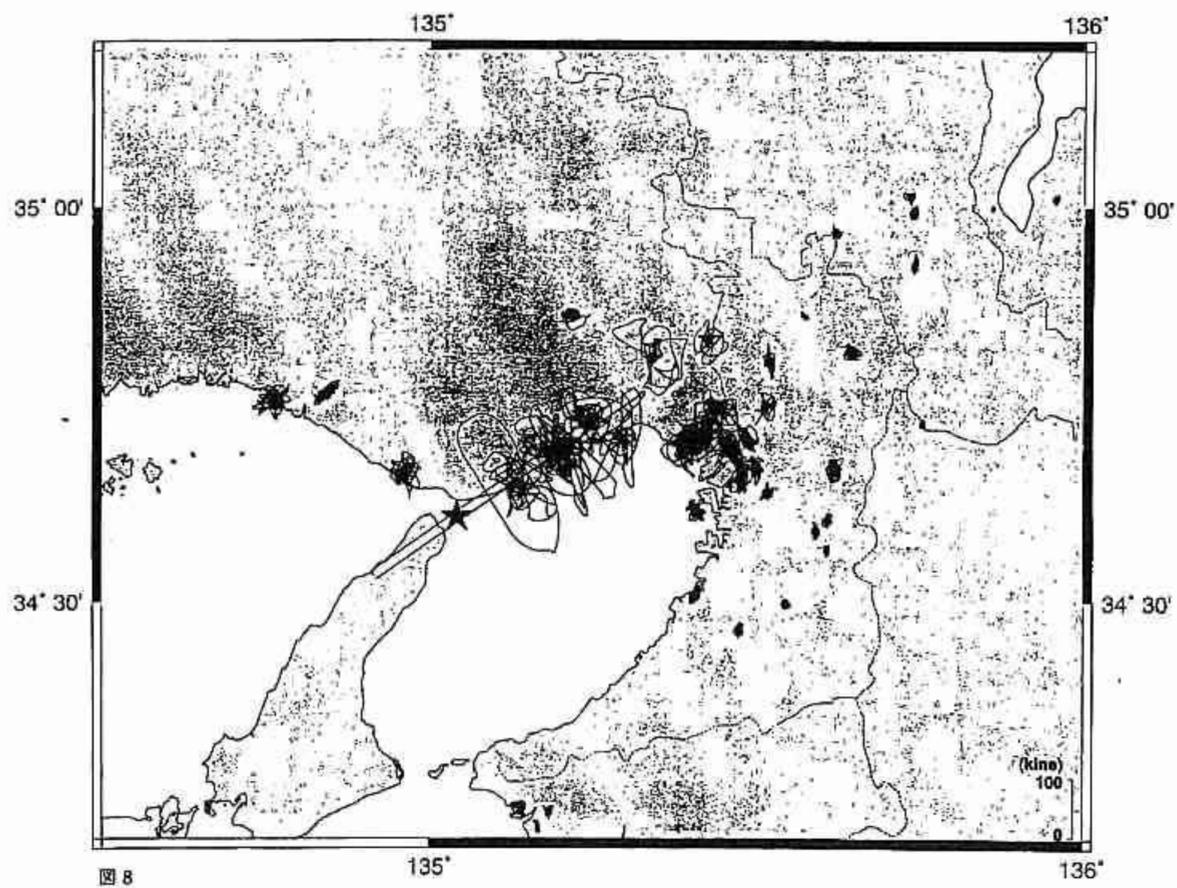


図 16-4 平成 7 年兵庫県南部地震における断層と速度波形の粒子軌跡²⁸⁾

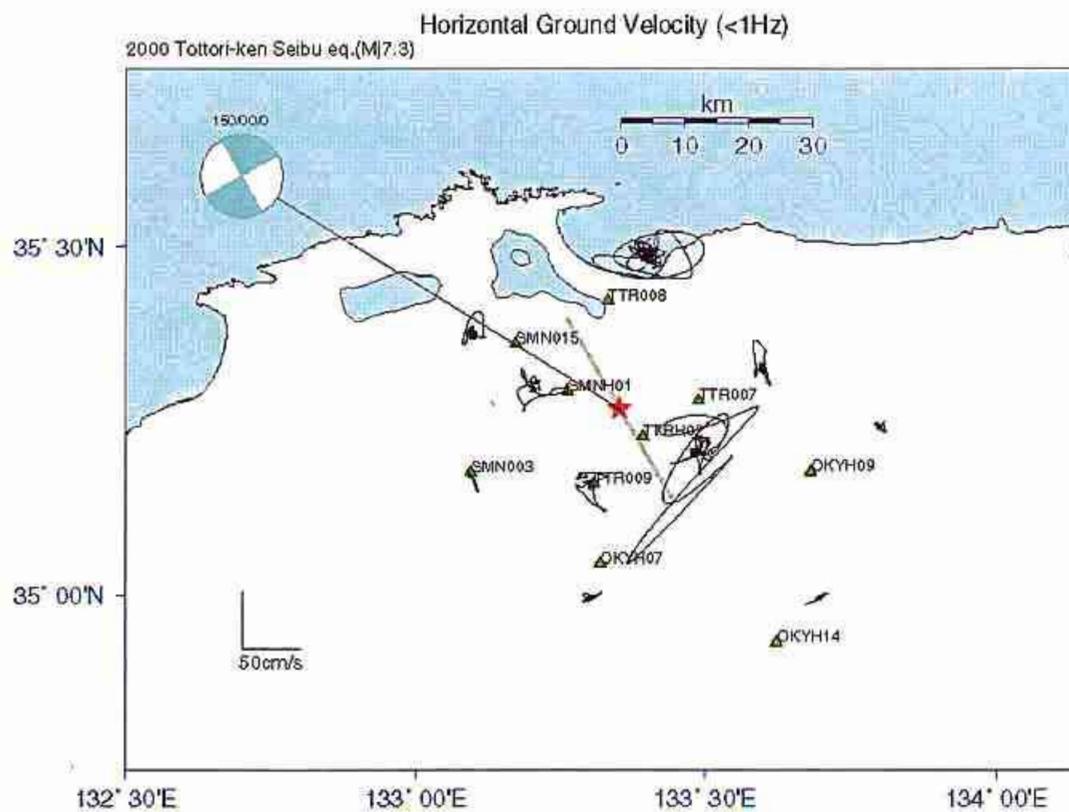


図 16-5 平成 12 年鳥取県西部地震における断層と速度波形の粒子軌跡 ³⁰⁾

17. 地震動の継続時間

デジタル式地震計で観測された地震動は、地震開始以前の遅延時間（振幅≒零）も観測記録に含まれている。また、地震動の主要動終了後も、非常に小さな振幅（振幅≒零）も記録し続けているため得られる波形の観測時間は非常に長いものとなる。理学分野と異なり工学では、ある程度大きな地震動振幅が重要であることから、次式で示される地震動振幅のエネルギー累積量が全観測時間のそれに対して 5%～95%になる区間を地震動の継続時間と定義することがある ³¹⁾。

$$\int_0^{t_{all}} \ddot{x}(t)^2 dt \quad (17-1)$$

ここで、 $\ddot{x}(t)$: 加速度, t_{all} : 地震動の全観測時間である。

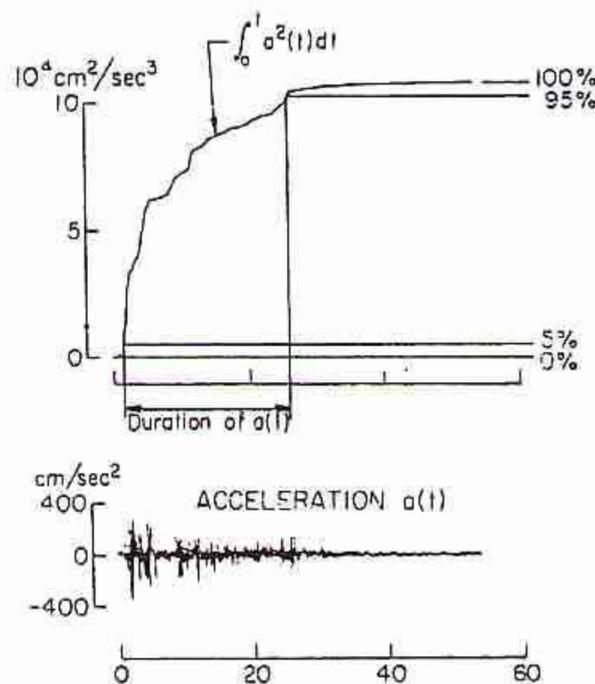


図 17-1 観測された地震動の継続時間の定義 ³¹⁾

19. スペクトル強度 SI 値

スペクトル強度 SI 値は、固有周期 0.1 秒～2.5 秒区間における減衰定数 20% の速度応答スペクトル $S_v(T, h=0.2)$ の平均値と定義され、次式で与えられる³²⁾。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, h=0.2) dT \quad (19-1)$$

大崎は、固有周期 0.1 秒～2.5 秒区間における速度応答スペクトルの平均値を求める理由として、ある程度剛性が高い構造物では、主要な固有周期帯は、概ね 0.1 秒～2.5 秒の間にあるものと考えられるとしている³³⁾。構造物の固有周期は、短周期から長周期にかけて様々なものがあり、構造物を構成する部材が塑性化した場合には、その固有周期も変化（長周期化）するため³³⁾、式 (19-1) のような平均化の操作を行った応答スペクトルの方が、最大加速度よりも地域の被災状況との対応が良いことが知られており、地震時の交通管制や都市ガスの遮断等を判断するための指標として SI 値が採用されることが多い^{32) 34)}。

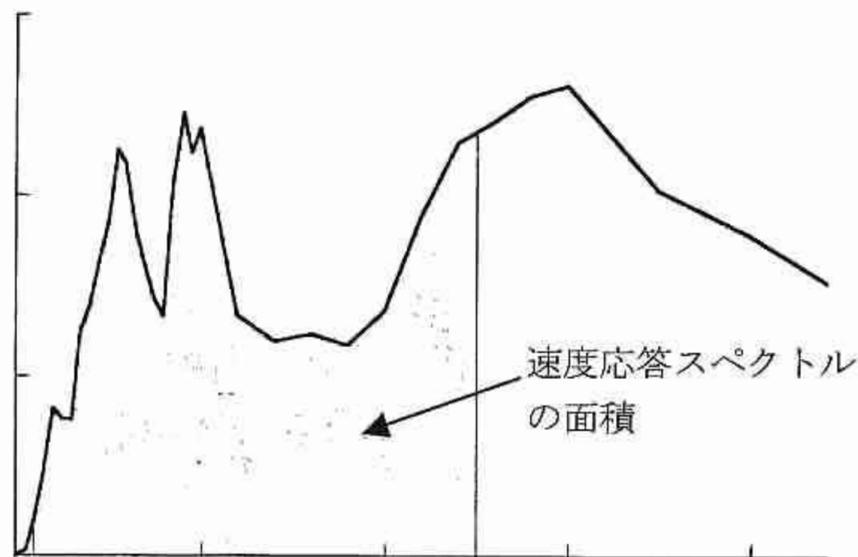


図 19-1 スペクトル強度 SI 値の概念図

20. 加速度応答スペクトル

地震動が構造物に与える影響を直接確認する方法に震動実験がある。これは、加振台の上に対象となる橋梁もしくはその模型を置き、その加振台を鳥取県西部地震で観測された地震動で震動させるというものである。現実には、震動実験は非常に高価であり、対象とする橋梁毎にこのような実験を行うことは不可能である。このため、多数の橋梁の性質を固有周期と減衰定数で代表させ、コンピュータの中で震動実験を行うのが、図 20-1 に示す応答スペクトルである。図に示すように、いろいろな固有周期 T と減衰定数 h を有する柱を加振台の上に置き、加振台を地震動で震動させ、各柱の頭部に設置された加速度計で加振台が震動することによって生じる柱頭部の加速度応答波形を計測する。そして、各柱の加速度応答の最大値を縦軸に、柱の固有周期を横軸にとりその交点を一つの線で結んだものが加速度応答スペクトルである。これを、橋梁の減衰定数毎に作成すれば、ある地震動がいろいろな橋梁に与える影響を加速度応答の大小で比較することができる。さらに、ある橋梁に対して、いろいろな地震動から得られた加速度応答スペクトルを比較すれば着目している橋梁がどの地震動の影

響を最も強く受けるかを知ることができる。加速度応答に着目するのは、得られた最大加速度を重力加速度 g で除した震度は、橋梁の耐震設計に用いる設計水平震度に相当するからである。震度は、橋梁の自重の何割に相当する水平力が地震時に作用するかを表した無次元量であり、対象とする地震動によって橋梁に生じる震度と橋梁の耐震設計で考慮した設計水平震度の大小関係や、対象とする地震動が、性質が異なる橋梁に与える影響の大小を容易に比較できるという利点を有している。

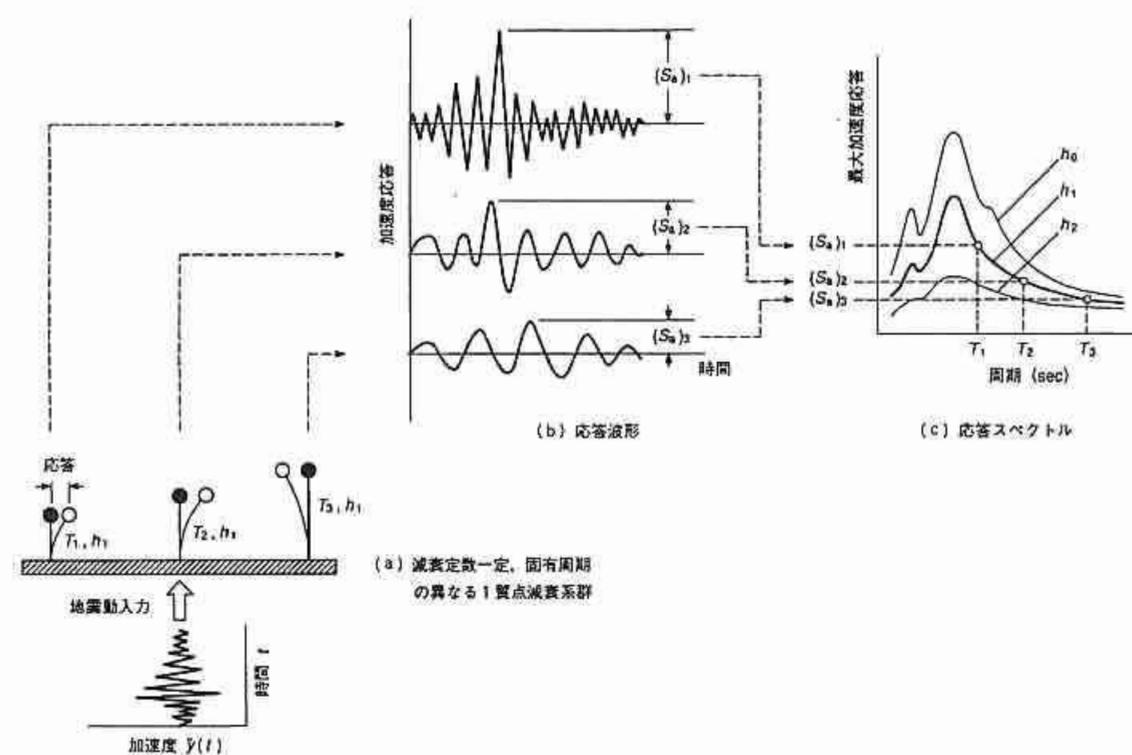


図 20-1 弾性加速度応答スペクトルの概念 33)

21. 所要降伏水平震度スペクトル

図 21-1 は、加速度応答スペクトルと同様にコンピュータの中で震動実験を行ったものである。加速度応答スペクトルと異なるのは、加振台には固有周期だけでなく、固有周期は同じであっても降伏水平耐力が異なる柱を多数載せていることと、加速度ではなく変位を計測する点である。そのため、同じ固有周期を有する柱であっても、降伏水平耐力が小さい柱には大きな塑性変形が生じ、降伏水平耐力が大きい柱には小さな塑性変形が生じることになる。その塑性変形を降伏水平変位で除して応答塑性率をもとめ、同じ応答塑性率毎に、柱の固有周期を横軸に、降伏水平耐力を自重で除した降伏水平震度を縦軸にとり、その交点を線で結んだものが所要降伏水平震度スペクトルである。応答塑性率は、構造物の損傷の度合いを示す指標としてよく用いられている。このように、所要降伏水平震度スペクトルは、橋梁に生じる変位を、耐震設計で許すことができる塑性変形以下にとどめるために橋梁に与えなければならない降伏水平耐力の下限値を、水平震度の形で示したものである。所要降伏水平震度スペクトルを用いて、対象とする地震動によって実在する構造物に生じる損傷が、許容できる損傷レベルにあるかどうかを判定することができる。例えば、許容できる損傷レベルが応答塑性率 4 であれば、応答塑性率 4 の所要降伏水平震度スペクトル上に、実際の構

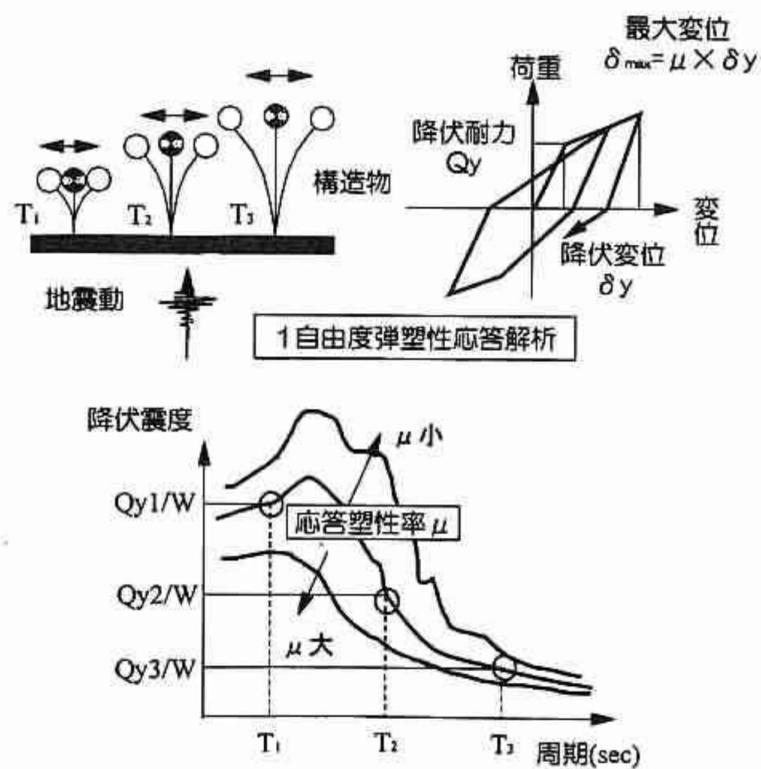


図21-1 所要降伏水平震度スペクトルの概念 35)

造物の固有周期と降伏水平震度をプロットする。このプロットした位置が、所要降伏水平震度スペクトルよりも下側にあれば、その造物の降伏水平耐力が足りないため応答塑性率が4よりも大きな損傷が生じることになる。逆にプロットされた位置が所要降伏水平震度スペクトルよりも上側にあれば、その造物の降伏水平耐力は十分であり、生じる損傷レベルは応答塑性率4よりも小さくなる。

参考文献

- 1) <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 2) <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 3) 国立天文台編：理科年表，pp.地 152-地 154，丸善，2000.11.
- 4) <http://wwwweprc.eri.u-tokyo.ac.jp/CSS/>
- 5) <http://www3.justnet.ne.jp/~m-nasuno/magni.htm>
- 6) <http://www3.justnet.ne.jp/~m-nasuno/Wave.htm>
- 7) 地震動編集委員会：ジオテクノート⑨地震動，pp.9-12，・地盤工学会，1999.3.
- 8) <http://www3.justnet.ne.jp/~m-nasuno/decide.htm>
- 9) 安藤雅孝，吉井敏尅編：理科年表読本地震，pp.49-55，丸善，1993.3.
- 10) 松田時彦：動く大地を読む，pp.7-9，岩波書店，1992.11.
- 11) <http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/10.htm>
- 12) 佐藤良輔編著，阿部勝征，岡田義光，島崎邦彦，鈴木保典共著：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，pp.23-49，鹿島出版会，1989.3.
- 13) 島村英紀著，地震はどこに起こるのか，pp.43-44，講談社，1993.12.
- 14) http://wwwweprc.eri.u-tokyo.ac.jp/CSS/moment_m.html
- 15) 日本列島の地震-地震工学と地震地体構造-，pp.18，鹿島出版会，1991.1.
- 16) <http://kombu.aob.geophys.tohoku.ac.jp/~igarashi/syuuron.html>
- 17) 安藤雅孝，吉井敏尅編：理科年表読本地震，pp.62-65，丸善，1993.3.
- 18) <http://www3.justnet.ne.jp/~m-nasuno/oshihiki.htm/>
- 19) <http://www.jishin.go.jp/main/mech/f2-8.htm>
- 20) 宇津徳治著：地震活動総説，pp.124，東京大学出版会，1999.12.
- 21) 菊池正幸：遠地実体波による震源のメカニズム，月刊地球，号外 No.13，pp.47-53，海洋出版，1995.8.
- 22) 鹿島都市防災研究会編著：都市・建築防災シリーズ1，大都市と都市災害，pp.58-59，鹿島出版会，1996.8.
- 23) ・日本建築学会：1995年兵庫県南部地震災害調査速報，pp.9，1995.3.
- 24) 大崎順彦著：地震と建築，pp.66-69，岩波新書240，1983.8.
- 25) 鹿島都市防災研究会編著：都市・建築防災シリーズ1，大都市と都市災害，pp.117-118，鹿島出版会，1996.8.
- 26) ・日本建築学会：地震動と地盤-地盤震動シンポジウム10年の歩み-，pp.225-251，1983.7.
- 27) 川島一彦，相沢興，高橋和之：最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式，土木研究所報告，第166号，pp.14-17，1985.9.
- 28) 福島美光：震源近傍における強震動のシミュレーションと強震動予測，セミナーテキスト，pp.3-4，2000.6.
- 29) 瀧瀬一起：カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震，科学，Vol.66，No.2，pp.93-97，1996.2.
- 30) <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwata/ttr.wave.html>
- 31) 理論地震動研究会編著：地震動-その合成と波形処理-，pp.112，鹿島出版会，1994.2

- 32) 土木研究センター：建設省災害情報システム・ガイドライン（案）抜粋，pp.248～249，1993.1
- 33) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，pp.148，鹿島出版会，1994.5
- 34) 研究代表者山崎文雄：文部省科学研究費（No.08248105）特定領域研究(A)(1)計画研究 C-1，社会基盤システムの実時間制御技術Ⅲ，東京大学生産技術研究所耐震防災工学研究室，2000.3
- 35) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計，pp.394，1999.10

