

# 1995年兵庫県南部地震による 野島断層領域の被害・無被害 ため池の多変量解析

藤井 弘章<sup>1</sup>・難波 明代<sup>2</sup>・西村 伸一<sup>3</sup>

## Multivariate analysis of damaged and undamaged embankment dams for irrigation in the Nojima Fault area due to the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake

Hiroaki FUJII<sup>1</sup>, Akiyo NAMBA<sup>2</sup> and Shin-ichi NISHIMURA<sup>3</sup>

### Abstract

This study tries to clarify the factors and mechanisms affecting the embankment dams that were either damaged (d) or undamaged (u) due to the earthquake on northern Awaji Island. Multivariate statistical analyses (including 10 or 11 items) were performed on 395 dams (d: 112, u: 283) in the Nojima fault area (Nj) and on 1562 dams (d: 348, u: 1214) in the 5 Town area (5T). On the peaks of category score (CS) for main items, there are six angles to the epicenter (Nj: 10, 150, 30, 70, 100 and 130 deg. in the order of CS peak values, 5T: 100, 160, 140, 70, 40 and 10 deg. *id.*), seven angles to the fault (Nj: 100, 80, 20, 160, 40, 140 and 120 deg. *id.*), one for the distance to epicenter (Nj · 5T: 10 km), and two for the distance to the fault (Nj: -150 and 600 m). These results can be explained by the radiation patterns. When they are combined with the relation between the emphasized seismic waves (*P* or *SV*: 45 and 135 deg, and *SH*: 0 and 90 deg., theoretical emergent angles to fault) and CS peak angles, they support secondary strong motion source *As'* as well as the primary *As* near the epicenter.

キーワード：1995年兵庫県南部地震, 野島断層, ため池堤体, 数量化理論Ⅱ類, 被害要因, 放射パターン

Key words: 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Nojima Fault, embankment dam for irrigation, quantification theory type II, factors of damage, radiation pattern

<sup>1</sup> 岡山県土地改良事業団体連合会 岡山大学名誉教授  
Okayama Prefectural Federation of Land Improvement  
Association  
Professor Emeritus, Okayama University

<sup>2</sup> 元岡山大学農学部  
ex. Faculty Agriculture of Okayama University

<sup>3</sup> 岡山大学大学院環境生命科学研究所  
Graduate School of Environmental and Life Science,  
Okayama University

本論文に対する討議は2021年5月末日まで受け付ける。

## 1. はじめに

兵庫県南部地震(1995.1.17,  $M=7.3$ )による被害の確定件数が、消防庁により震災後11年を経て発表された(朝日新聞・2006.5.20付)。尊い人命の喪失6,434名、家屋の損壊639,686棟という。報道されることは少なかったが農村部では多数のため池が被害を被った。ため池は、小規模のものが多くが広義のフィルダム(Embankment Dam)であり、農業用水源として重要な土構造物である。その被害数は、兵庫県全体で1,362個、淡路島では961個に及ぶという(兵庫県農林水産部農地整備課, 1996)。

これらの現地調査に行くと、被害ため池のすぐ近傍に、無被害のため池が共存している例が数多く見られた。なお、本論で言う「ため池」とは、広義の「貯水池」の意味ではなく、狭義の「(ため池)堤体」である。したがって、ここでの「被害」とは「堤体の被害」のことである。

筆者は、この被害・無被害を分けた要因を探ろうとしてきた(藤井・他, 1996; 2000a; 2000b; 2005)。最初に、野島断層がある北淡町のため池509個(被害181個, 無被害328個)についてやや詳しい調査・解析を行なった(Fujii et al. 2000a; 藤井・他, 2002)。その後、この手法を敷衍して、淡路島北部5町(現淡路市)つまり旧北淡・淡路・一宮・東浦・津名町のため池1788個(被害350個, 無被害1438個)を対象を広げた(藤井・他, 2005)。前者を「北淡町領域」、後者を「5町領域」と呼んでいる。

手法は、文書資料より得たデータの、数量化理論Ⅱ類による多変量解析である。その結果、地震関連の項目毎の最大被害は、①震央からの距離が10~15 km付近、②最も近い断層より1000 m以内、③堤軸については震央にほぼ正対、および④堤軸が最も近い断層にはほぼ直交のものに生じていた。そして、震度7地帯の一部が①に重なる。③、④の原因として、大きな影響が考えられる野島断層と、震央の位置が関係しているのではないかと考えられた。すなわち、Fig. 1に見られるように、震央(図中☆印)に正対しているため池の堤軸は、野島断層(図中Nojima)にほぼ直交となるからで

ある。

北淡町領域および5町領域の解析において、断層距離・断層角度は、最近断層つまり各ため池から最も近い断層に対するものである。そこで、本論では、震源断層といわれる野島断層を中心とする領域(「野島断層領域」あるいは「野島領域」と呼ぶ)のため池を対象を絞り、野島断層および震央の被害への関わりを明らかにしようとした。同時に、前論(藤井・他, 2005, 以下同じ)の5町領域のデータを整理しなおし、再解析・再検討を行った。さらに野島領域の結果と比較検討し、いささか不可解なところもある前論の結果(上記①~④等)の生じた理由、その被害のメカニズムを明らかにしようとする。

本研究は多変量解析として数量化理論Ⅱ類を用いている。この手法は、ある要因に注目したとき、他の要因の影響を取り除いた被害への寄与が得られる。震央距離・震央角度が被害に無関係であれば、解析結果に現われる筈である。これらの結果をもとに、被害に与える野島断層および震央の影響について考察する。そして、結果の妥当性について、兵庫県南部地震関連の地震学的な既往文献の成果を踏まえつつ総合的に検討する。

2章では多変量解析の手法・評価方法について、既発表の結果を引用しつつ述べた。3章では野島領域と5町領域の多変量解析結果を比較し論議する。4章で震央について改めて検討し、5章、6章でこれらの結果を、各種文献の地震学的な成果を援用して総合的に論議する。

## 2. 研究方法

### 2.1 概説

本研究の流れは、(a)解析対象領域の決定、(b)目的変数の決定、(c)説明変数の仮定、(d)資料収集、(e)データ収集および検定、(f)サンプル数の決定、(g)データの加工、(h)解析方法の決定、(i)解析、(j)解析結果の評価となる。

(a)の解析対象の野島領域は、Fig. 1のように、野島断層の両端で直交する2本の直線によって囲まれた領域とした。いわばこの2本の線で淡路島を切り出したと言える。5町領域のため池の

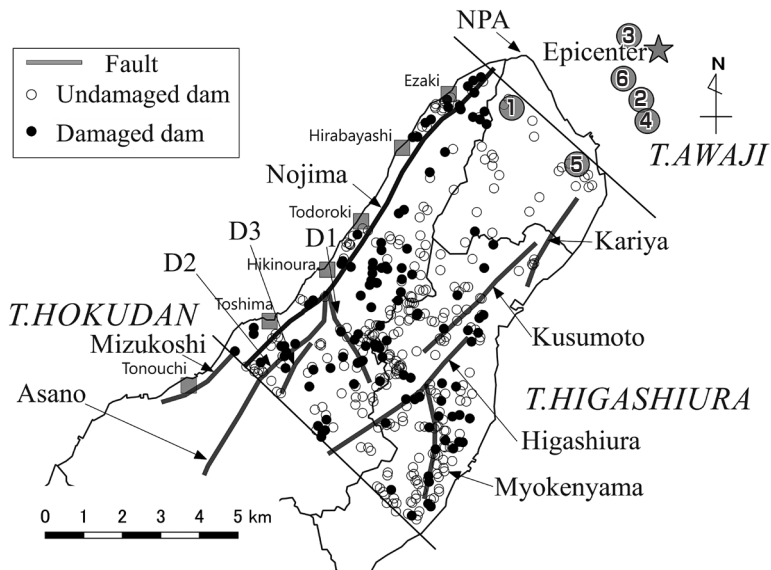


Fig. 1 Location of the (damaged and undamaged) dams and faults in the Nojima (Fault) area

NB. 1) ①~⑥: Approximate locations of the mainshock epicenters according to literature. Some circled numbers (①, ②, ⑤) are the same one on Table 2. ① JMA95: Japan Meteorological Agency (1995), ② JMA97a (1997), ③ CRHAED: Committee for the Report on Hanshin-Awaji Earthquake Disaster (1998), ④ NAOJ: National Astronomical observatory of Japan (2003), ⑤ USGS: United States geological survey (Kikuchi, 1998), ⑥ JMA97b (1997), 2) ☆: Current epicenter ( $34^{\circ}36.4' N$ ,  $135^{\circ}02.6' E$ ) in the present paper, 3) NPA: Northernmost point of Awaji Island:  $34^{\circ}36'33'' N$ ,  $135^{\circ}00'08'' E$ .

内、野島断層領域内にある395個のため池を同定し、解析対象とした。なお、本研究での野島断層は「1:25,000 都市圏活断層図 明石」(国土地理院, 1996a)に記載されている「野島地震断層」を用いている。Fig. 1には、野島断層以外の断層(活断層研究会, 1991)も記載している。

(b)の目的変数は、外的基準(田中・垂水, 1997;木下, 1992;菅, 1993),被説明変数(上田・他, 2003),従属変数(古谷野, 1988)などとも呼ばれる。目的変数として、被害の有・無の他、被害の大・中・小、クラックの大きさ等の被害を数量化することが考えられた。予備的な解析(藤井・他, 1996;1997a;1997b;1998a;1999a;1999b)を経て、最も単純で、かつ良好な結果が得られた、被害の有無、つまり、被害「あり」・「なし」の2項目を選んだ。「あり」は、斜面の崩壊から補修を

要するクラックまでの被害を含む。

(c)の説明変数は、この場合、被害に関わる要因のことで、アイテムとも呼ばれる。これはさらにその要素であるカテゴリ分けがされる。例えば、「ダムサイトの表層地質」が「花崗岩」という場合、前者がアイテム、後者がカテゴリとなる。

アイテムの選定には、次のような制約がつく。すなわち、①なるべく多くの被害・無被害ため池を解析対象とできること、②当然、両者における共通要因(アイテム)であること、③そのアイテムのデータは信頼性があり、各ため池について、客観的かつ同一精度、再現性のあるデータであること、④地震関連も含め、ため池堤体(フィルダム)の工学的な設計、管理上の基本的な項目であること、⑤それら資料、データを(比較的簡単に)入手できること、等である。

ある意味では⑤が制約条件として最も厳しい。重要だと思われるアイテムでも入手不可能な場合が多いからである。しかし、このように大変な犠牲を伴った、自然災害については、たとえ不完全でも、データを取得・解析を行い、結果を検討、評価して公表すべきであろう。本研究もその視点にたっている。

(d)の資料には、文書資料と現地調査資料がある。現地調査は労力と時間がかかる上、被害ため池がいつまでも放置されているわけではない。そこで、5町領域における文書資料のため池の約5%を目処に現地調査を行なった。まず代表的な被害ため池を約1年調査した。その後数年にわたり、原則として、被害ため池近傍で、ほぼ同じ大きさの無被害ため池をほぼ同数調査した(藤井・他, 1998b; 2004a; 2004b)。ただし、両者合わせて100サンプルに充たない。したがって、現地データを用いた解析は、北淡町領域、5町領域、野島領域とは別に行なった(藤井・他, 2004b; 2014; 2016)。

(e)は、得られた文書資料から、必要データの収集、データの信頼性をチェックする作業のことである。

(f)は、解析に用いるサンプルすなわち解析対象のため池を決定することである。これには、複数の資料から得られたデータを照合し、(c)項の①②③④を満足するアイテム、つまり最大公約数的なアイテムを含むサンプルを決定する。(c)～(f)項については2.2項で補足する。

(g)のデータの加工は、得られたデータを、解析方法に合わせた数量化、カテゴリー分け等の作業等がある。説明変数のカテゴリー分けは、原則として、(i)各カテゴリーの間隔をほぼ同じ(例えば震央距離は3kmずつ)、(ii)サンプル数をほぼ同数、(iii)1カテゴリーに少なくとも10サンプルを入れようとした。ただしこれは絶対条件ではない。なお、菅(2006)は1カテゴリー最低3サンプルとしている。

(h)の解析方法は、多変量解析として、数量化理論Ⅱ類(2.3節)を用いている。

(j)の結果の評価は、統計的な評価とともに、

工学的、地震学的の評価がある。すなわち、(c)項、(g)項のアイテムやカテゴリー分けは、一つのモデルであり、仮定である。これらが妥当かどうか、また(h)の解析手法が適正かどうかを評価する。統計学的な評価としては、相関比、重相関係数、判別の中率等がある。さらに、藤井らは確率的判別の中率および相対精度を提案した(Fujii et al. 2000a; 藤井・他, 2002)。これらについては2.4節で述べる。また、3.4節に述べる説明変数間の独立性の検討も必要である。地震学的な検討・評価については5章で行なう。

## 2.2 被害要因の選定とサンプル数の決定

### (1) データ収集と検証

本論の解析対象野島領域のため池の395個は、5町領域の1788個(藤井・他, 2005)から選んでいる。これは、上記(c)項の観点から、公的資料である「被害ため池台帳」・「同位置図」(兵庫県, 1995a; 1995b), 「ため池台帳」・「同位置図」(兵庫県, 1977a; 1977b)を用いた。前者には425個、後者には灌漑面積5000 m<sup>2</sup>以上の2041個のため池が記載されている。しかし、両台帳の作成時は異なり、かつ掲載基準・項目も一致しない。そこで、両台帳および位置図を照合し、それぞれに記載されているため池の名称・堤体諸元・所在地が一致するものを選別した。その所在位置を、地形図(1/25000, 1/10000), および必要に応じて空中写真(国土地理院, 1995)で確認し、1788個(被害350個, 無被害1438個)を同定した。さらに本論では5町領域として、後述(3.1節)するように、この内から1562個(被害348個, 無被害1214個)を選んで再解析している。

また、これらの台帳に記載されている堤高・堤長と、現地調査で測量した62個のため池の堤高・堤長の計測値を比較した。記載値(y)と計測値(x)の間には、 $y=x$ の正の相関があり、その相関係数は堤長が0.932, 堤高が0.848であった。よって、台帳記載値をそのまま用いることにした(藤井・他, 2005)。

## (2) 被害要因の選定

被害に関わる要因には誘因(外因)と素因(内因)がある(藤井・他, 2005)。誘因は当然、個々のため池に作用する地震加速度である。しかしこれを個々のため池について定量的に把握することは不可能である。したがって、本研究における要因とは素因を意味する。ダム工学関連の文献(USBR: United States Bureau of Reclamation, 1960; 発電水力協会, 1972; 農林水産省構造改善局, 1981)等を参考に、被害要因を大きく5項目に分けて整理した。それらは、A) 堤体の位置、B) ダムサイトの地質、C) 堤体の構造、D) 堤体用土の土質特性、E) ため池の履歴である(Fujii et al., 2000a)。

A) は、各ため池の空間的な位置と震央・断層との位置関係である。項目としては、前論でも述べたが、①震央距離: Fig. 2において、ため池堤軸中心C( $x_c, y_c$ )から震央E( $x_e, y_e$ )までの直線距離 $d_e$ 、②震央角度: Cからの堤軸法線 $n_c$ と直線CEとがなす交角 $\theta_e$ 、③断層距離: Cから断

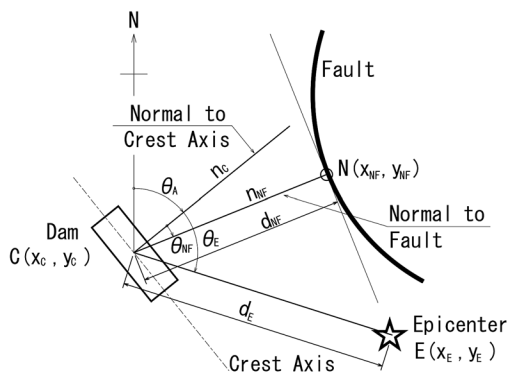


Fig. 2 Definitions for the items concerning to earthquake

NB. 1) C: the center of dam axis, 2)  $n_c$ : a normal to the dam axis at C, 3)  $\theta_A$  (AZ): the azimuth of the normal to C at the dam axis, 4)  $n_{NF}$ : the normal at N on the fault, 5) N: the nearest point on the fault from C, 6)  $\theta_{NF}$  (AF): the angle to the fault (angle of intersection  $n_c$  and  $n_{NF}$ ), 7)  $d_{NF}$  (DF): the distance to the fault (distance from C to N), 8) E: the epicenter, 9)  $\theta_E$  (AE): the angle to the epicenter (angle of intersection  $n_c$  and CE), 10)  $d_e$  (DE): the distance to epicenter (distance from C to E).

層上の最近点N( $x_{NF}, y_{NF}$ )への直線距離 $d_{NF}$ 、④断層角度:  $n_c$ とNにおける断層法線 $n_{NF}$ との交角 $\theta_{NF}$ 、⑤(堤軸法線)方位角:  $n_c$ の方位角 $\theta_A$ (北から時計回りに測定)、および⑥ダムサイトの標高などである。

震央角度・断層角度は、C) 項のダムの構造に関わるアイテムでもある。これらは、堤軸中心からの法線 $n_c$ を基準に測定している。最近断層に関する項目は、5町領域には含まれるが、野島領域には用いていない。

ため池、震央、断層等の位置は、国家座標であるX, Y座標(国土地理院, 1994; 1997)で表示し算定した。なお、測地基準系は、平成14年に、日本測地系から世界測地系に変更された(国土地理院, 2002; 2009)。緯度の表記が0.2秒ずれるが、位置そのものは変わらないし、当然、相対的な位置関係は不変である。したがって、本論ではすべての座標(震央位置も含め)は、日本測地系で示している。兵庫県は日本測地系の第V系に属し、その原点は北緯36°00'0.0000", 東経134°20'0.0000"である。

B) のダムサイトの地質とは、ダムサイトの表層地質、基礎岩盤までの深さ、基礎地盤の土質特性などがある。表層地質は地質図(地質調査所, 1992a; 1992b; 1996)から求めた。同図には、21種の地質区分があったが、これを花崗岩系・砂岩系・泥岩系・礫質土系・砂質土系・粘性土系の6カテゴリーに分類した。基礎岩盤までの深さおよび基礎地盤の地質特性については、現地調査したため池から、近接する被害・無被害ため池を5組計10個選び、弾性波探査を行なった(藤井・他, 1998b)。サンプル数の点から、多変量解析には用いてないが、3.2(5)項で簡単に紹介する。

C) の堤体の構造(設計)に関わるものとしては、ダムの型式・堤高・堤長・堤頂幅・斜面勾配・堤軸の形状・連続池の有無等があり、結果的に、堤体積・貯水量が関係してくる。調査したため池は、すべて「土えん堤」(アースダム)だが、型式としては、均一型・中心コア型・傾斜コア型があると考えられる。被害ため池についてはある程度情報が得られるが、古くからある無被害ため池では

精度の高い情報は望めない。

堤高・堤長は、(1)項で述べたように、ため池台帳・被害ため池台帳の値を用いた。堤軸の形状は、台帳のため池位置図および地形図から求めた。また台帳には堤体積、貯水量が記載されている。これらは、予備解析の結果、堤高、堤長に密接に関係していた。そこで、[堤高×堤長]を指標として用いることにし、「堤体量」と定義した。堤体量( $m^2$ )はいわゆる堤体積( $m^3$ )ではない。同じく予備解析の結果、斜面勾配・堤頂幅と、被害・無被害の間には有意な差がみられなかった。

「連続池」は、一般に、重ね池あるいは親子池とよばれている。ため池が2個連なり、上流側ため池堤体の下流側法尻が、下流側ため池の貯水敷内にある。下流ため池の貯水位が高いと、法尻が飽和して見かけの剪断抵抗が減少し、地震力が加わると安定性に問題が生じる可能性がある。北淡町領域で用いたが、被害への関与を表す偏相関係数(2.3節)は13項目中12位であった(Fujii et al., 2000a; 藤井・他, 2002)。また、連続池の被害は下流側のため池の貯水位に大きく左右されると考えられる。しかしながら全ため池の地震時の貯水位を、同一精度で知ることが不可能であった(E項参照)。

D)の堤体用土の地盤工学的特性として、貫入抵抗、含水比、粒度、土粒子密度等を測定した。手法としては、対象ため池の堤頂部をハンドオーガーにより表面の植生等の影響のない深さ(深度30~50 cm)まで掘削し、底部の貫入抵抗(藤井・他, 1972; 藤井, 1990; 1995)を少なくとも5点測定した。その後、底部の土をサンプリングして、実験室に持ち帰り、土質試験(土粒子密度、粒度、含水比等)・土質分類を行なった(藤井・他, 1998b; 2004a; 2004b; 2014; 2016)。これらを土質アイテムと称する。ただし前述のように、土質アイテムのサンプル数は少ない。これらを用いた多変量解析は別に行なった。その結果等を3.2(5)項で簡単に紹介する。

E)のため池の履歴としては、築堤年代、地震前の改修の有無・漏水状況・堤体の変形状況・貯水状況等がある。築堤年代、漏水状況、改修歴は

ため池台帳に載っている。ただし、築堤年代については、聞き取り調査によると思われ、統計上からは精度に問題が残る。そこで北淡町領域(Fujii et al., 2000a; 藤井・他, 2002)では、明治24年(1891年)作成の土地台帳(北淡町, 1891)を用いて確認した。同台帳には当時の土地利用状況(ため池、畑、水田、原野等)が記載されている。現在のため池位置と照合し、築堤年代を1891年以前と1891年以降の2カテゴリーに分けた。多変量解析の結果、偏相関係数は13アイテム中11位で、前者の被害が多いという有意な差はあった。しかし、古い土地台帳による土地利用状況と現在のそれとを照合し、決定するには、かなりの労力と時間がかかる。しかもその結果は予想通りで1891年以前、つまり地震発生より105年以前に築造されたため池の被害の方が、それ以後のものより多かった。これは他の4町においても同様であると思われた。また、独立性(3.4節)の検討から、このアイテムの有無が、他のアイテムの解析結果には影響しないと判断された。

貯水状況はC)項で述べたように堤体の安定性に影響する可能性がある。被害ため池については、聞き取り等によって情報は取得できると思われる(内田, 1996)。しかし、本件のように非灌漑期の山奥にある無被害ため池千数百個について同一精度で知ることが不可能に近い。そこで、北淡町領域については、震災直後の空中写真(国土地理院, 1995)からの判読を試みたが、全てのため池について同一精度で知ることが困難であった。管理状況、堤体の変形状況(沈下、斜面変形など)も、聞き取りに頼らざるを得ず、精度も落ちるとともに、同一精度という条件は不可能と思われた。

これらの検討の結果、本論におけるアイテムを次の11項目に定めた。なお、括弧内には、本論で用いる呼称および図表に用いる略称を記した。地震関連のアイテムとしては、①震央距離(Distance to Epicenter: Dis Epc, DE)、②震央角度(Angle to Epicenter: Ang Epc, AE)、③断層距離(Distance to Fault: Dis Fa, DF)、④断層角度(Angle to Fault: Ang Fa, AF)である。

非地震関連としては、⑤堤軸法線方位角

(Azimuth: Az, AZ, 単に「方位角」と記すことが多い), ⑥ダムサイトの標高(標高: Elevation) ⑦堤体の大きさ(堤体量: Embankment Volume, Emb Vol), ⑧堤軸の平面形状が単軸か多軸か(平面形状: Plane View), ⑨ダムサイトの表層地質(表層地質: Surface Geology, Geology), ⑩地震前の漏水の有無(漏水: Leakage), ⑪地震前の改修履歴(改修: Repaired)である。これらのアイテムのデータは、いずれも文書(台帳, 地形図など)から得られているので、必要に応じ「文書アイテム」, 「文書データ」と呼ぶ。

①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦は, 定量的つまり量的変数であり, ⑧, ⑨, ⑩, ⑪は定性的つまり質的変数である。また, ①, ③, ⑥は, ため池の位置に関わるアイテムであり, ②, ④, ⑤, ⑦, ⑧はため池の構造に関わるもの, ⑩, ⑪はため池の履歴に関わるアイテムである。これらアイテムの, カテゴリーの最大総数は93項目ある。

なお本論では, 野島領域と比較するために, 5町領域の結果も示している。これには, それぞれのため池から最も近い断層名(最近断層: Nearest Fault: Nearest Fa)も入っている。この場合の断層距離・断層角度は, 最近断層に対するものである。カテゴリー数は最近断層の15断層分が加わる。表層地質, 標高, 平面形状の3アイテムには, 不明(Unknown)のカテゴリーが含まれている。不明のカテゴリーを持つため池を排除してサンプル数が減少することと, 不明項を加えることによる解析への影響を勘案して定めた。これらのアイテムより, 地震関連のアイテムを含むサンプルを重視したからである。

### 2.3 数理化理論Ⅱ類

本研究では多変量解析として, 数理化理論Ⅱ類を用いた(2.1節, 藤井・他, 2002; 2005)。数理化理論Ⅱ類は, 「質的な形で与えられた外的基準(目的変数:本論では, ため池堤体の被害の「あり」・「なし」)を質的な要因(説明変数:同じくアイテム, カテゴリー)に基づいて予測あるいは判別する手法」である(田中・脇本, 1983)。

この手法では, 量的変数を質的変数化つまりカ

テゴリー化して算定できる。例えば本論では, 断層角度・震央角度の, 「0度以上10度未満の範囲の角度」(量的変数)を, 「0度」とし1つのカテゴリー(質的変数)にした。したがって本研究のように, 地質・平面形状などの質的変数と, 断層距離・断層角度などの量的変数が混合しているデータには有効な手法である。

目的変数の数量化にあたっては, 被害「なし」を1に, 「あり」を2とした。前者を1群, 後者を2群に属するという。この実際の被害・無被害に対して, 理論的に, ため池  $T_{im}$  が, 無被害(1群:  $i=1$ )か, 被害(2群:  $i=2$ )かを次式で判別する。

$$y_{im} = \sum \sum A_{jk} x_{imjk} \quad (1)$$

この「各アイテム・カテゴリーに対応するダミー変数  $x_{imjk}$  の線形式」(田中・脇本, 1983)は, 判別方程式(田中・垂水, 1997), 判別式(菅, 1993)等と呼ばれる。 $y_{im}$  はサンプルスコア, 外的規準(垂水, 1995), 目的変数などと呼ばれる(菅, 1993)。第  $i$  群の  $m$  番目の個体(ため池  $T_{im}$ )の評点と言える(田中・脇本, 1983)。 $y_{im} > 0$  のとき1群,  $y_{im} < 0$  のとき2群と判定されることになる。ただし, この結果はあくまで(1)式によって判定された理論的な結果(無被害か被害か)であり, 実際の結果(無被害か被害か)とは必ずしも一致しない。両者が一致した割合つまり正答率が次項に述べる判別の中率である。

$x_{imjk}$  はダミー変数と呼ばれる。例えば, ため池  $T_{im}$  が, アイテム  $j$  (例えばダムサイトの表層地質)のカテゴリー  $k$  (例えば花崗岩)に属するとき,  $x_{imjk}$  は1, 属さない時, 0となる。(1)式の右辺は,  $x_{imjk} = 1$  の  $A_{jk}$  を拾い出して加えることを意味する(田中・脇本, 1983)。それぞれのアイテムでは1個ずつのカテゴリーが選ばれることになる。野島領域のCase 2の場合(Table 1), 10アイテムあるので, 右辺は10項の多項式となる。そして, 各ため池(野島領域では, 1群: 283個, 2群: 112個)ごとに  $y_{im}$  に関する式が成立することになる。

$A_{jk}$  は, ダミー変数の係数(田中・脇本, 1983), カテゴリースコア(菅, 1993), カテゴリー数量

Table 1 Data for and accuracy of the analyses

| Case  |                 | 1                   | 2     | 3   | 4                     | 5         | 6                         | 7              | 8               | 9                         | 10                        | 11                  |
|---|-----------------|---------------------|-------|---|-----------------------|-----------|---------------------------|----------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|
|   | Abbr.           | Nojima (Fault) Area |       |   |                       |           |                           |                | 5 Town Area     |                           |                           | <i>Hokudan Area</i> |
|   |                 | Without Azimuth     |       |   | With Azimuth          |           |                           |                | Without Azimuth |                           |                           |                     |
|   |                 | All <sup>(6)</sup>  | All   | w/o AE <sup>(7)</sup> & DE <sup>(8)</sup> | Az All <sup>(9)</sup> | Az w/o AE | Az w/o AF <sup>(10)</sup> | Az w/o AE & AF | All             | <i>Fujii et al (2005)</i> | <i>Fujii et al (2002)</i> |                     |
| 1.Number of Dams  | T               | 395                 | 395   | 395                                       | 395                   | 395       | 395                       | 395            | 1562            | 1788                      | 1788                      | 509                 |
| Undamaged   | U               | 283                 | 283   | 283                                       | 283                   | 283       | 283                       | 283            | 1214            | 1438                      | 1438                      | 328                 |
| Damaged   | D               | 112                 | 112   | 112                                       | 112                   | 112       | 112                       | 112            | 348             | 350                       | 350                       | 181                 |
| 2.Damage Rate <sup>(1)</sup>  | DR              | 28.4                | 28.4  | 28.4                                      | 28.4                  | 28.4      | 28.4                      | 28.4           | 22.3            | 19.6                      | 19.6                      | 35.6                |
| 3.Analysis Indcies  |                 |                     |       |   |                       |           |                           |                |                 |                           |                           |                     |
| Correlation Ratio   | CR              | 0.306               | 0.309 | 0.235                                     | 0.341                 | 0.288     | 0.294                     | 0.251          | 0.182           | 0.187                     | 0.186                     | 0.280               |
| Correlation Coefficient   | CC              | 0.554               | 0.556 | 0.484                                     | 0.584                 | 0.537     | 0.542                     | 0.501          | 0.427           | 0.432                     | 0.431                     | 0.529               |
| Hitting Ratio (%) <sup>(2)</sup>  | H <sub>R</sub>  | 76.5                | 75.9  | 70.9                                      | 79.0                  | 73.7      | 75.4                      | 73.4           | 70.0            | 73.6                      | 73.5                      | 73.5                |
| H <sub>R</sub> due to Probability <sup>(3)</sup>                                    | H <sub>RP</sub> | 59.4                | 59.4  | 59.4                                      | 59.4                  | 59.4      | 59.4                      | 59.4           | 65.4            | 65.4                      | 68.5                      | 54.2                |
| Relative Accuracy 1 <sup>(4)</sup>  | R <sub>AI</sub> | 1.29                | 1.28  | 1.19                                      | 1.33                  | 1.24      | 1.27                      | 1.24           | 1.071           | 1.074                     | 1.070                     | 1.360               |
| Relative Accuracy 2 <sup>(5)</sup> (%)  | R <sub>AZ</sub> | 42.2                | 40.6  | 28.4                                      | 48.3                  | 35.3      | 39.5                      | 34.6           | 13.5            | 16.2                      | 15.9                      | 42.1                |
| 4.Used Software   |                 | Esumi               | Esumi | Esumi                                     | Esumi                 | Esumi     | Esumi                     | Esumi          | Esumi           | Esumi                     | SPSS                      | SPSS                |
| 5.Coefficient of Association between two kinds of Angles (r <sub>c</sub> )          |                 |                     |       |   |                       |           |                           |                |                 |                           |                           |                     |
| Two kinds of Angle to   |                 |                     |       |   |                       |           |                           |                |                 |                           |                           |                     |
| Epicenter & Fault   | AE & AF         | 0.391               | 0.166 | -   | 0.391                 | -         | -                         | -              | -               | -                         | -                         | -                   |
| Epicenter &Azimuth  | AE & Az         | -                   | -     | -   | 0.464                 | -         | 0.464                     | -              | -               | -                         | -                         | -                   |
| Fault & Azimuth   | AF & Az         | -                   | -     | -   | 0.525                 | 0.525     | -                         | -              | -               | -                         | -                         | -                   |
| 6. Single Correlation Coefficient (SCC) between CS and DR for Items relating Angles |                 |                     |       |   |                       |           |                           |                |                 |                           |                           |                     |
| Angle to Epicenter  | AE              | 0.833               | 0.800 | -   | 0.880                 | -         | 0.872                     | -              | -               | -                         | -                         | -                   |
| Angle to Nojima Fault   | AF              | 0.759               | 0.823 | 0.936                                     | 0.829                 | 0.760     | -                         | -              | -               | -                         | -                         | -                   |
| Azimuth   | Az              | -                   | -     | -   | 0.122                 | 0.538     | 0.599                     | 0.941          | -               | -                         | -                         | -                   |

NB. 1) D/T×100, 2) cf. eq. (2), 3) cf. eq. (3), 4) cf. eq. (4), 5) cf. eq. (5). 6) used all items without AZ (the azimuth of the normal to the dam axis), 7) AE: angle to the epicenter, 8) DE: distance to the epicenter, 9) used all items including AZ, 10) AF: angle to the Nojima fault, 11) cf. Fig. 2.

(木下, 1995; 有馬・石村, 1987), カテゴリーウエイト(古谷野, 1988)等と呼ばれている。本研究では「カテゴリースコア」(Category Score, 原則としCSと表記)を用いる。上記の例では, カテゴリー総数は79個あるので $A_{jk}$ (未知数)も79個のあることになる。 $A_{jk}$ は被害および無被害ため池を最も明確に判別するよう定められる。具体的には, 「相関比」(cf. 次項, 以下, 原則として「cf」を省略)を最大にするように決定される。

CSは, カテゴリーkの被害に対する寄与を表す。他のアイテムの影響を全て取り除いたときの, そのカテゴリーが目的変数(被害)に及ぼしている影響の大きさ(古谷野, 1988)である。これは本研究では, 特に重要な性質である。例えば, 震

央角度10度の被害率が50%というとき, 表層地質, 断層距離等, 他の要因が影響している可能性がある。CSはそれらの影響を除去した震央角度だけの, 被害への寄与を表すからである。また, 各カテゴリーが属する各アイテムに関係なく, 全カテゴリーのCSの大きさを比較できることも大きな利点である。

各アイテムjの被害に関する影響の強さは, 偏相関係数の値で示される。他の変数の影響を取り除いた時の, そのアイテムの影響の大きさを表し, 標準化された係数, 0~1で表される(古谷野, 1988)。なお, 本論の数量化理論Ⅱ類の解析には, 市販ソフト(「Excel数量化理論ver2.0」, エスミ社)を用いた。SPSS(垂水, 1995)と比較計算し



たが、その結果と一致しているとしてよい (Case 9・10, Table 1, 3.1節)。

### 2.4 結果の評価—解析精度

数量化理論Ⅱ類の解析モデルの精度、つまり、アイテムやカテゴリーの選定の適正さや、結果の信頼性の判定には、相関比 (Correlation Ratio: CR と略記)、判別率 (Hitting Ratio:  $H_R$  と略記)、レンジ (Range) 等が用いられる。

**相関比**：相関比は、「(群間分散) / (全分散)」として定義される (田中・脇本, 1983; 木下, 1992)。本論の場合、「群間分散」は、(1)式で算定された1群(無被害ため池)および2群(被害ため池)のそれぞれのサンプルスコアの群間の分散

$$\sum_i (\bar{y}_i - y_a)^2 \times n_i / n$$

である。ここに、 $\bar{y}_i$  は  $y_{im}$  の  $i$  群内の平均、 $n_i$  は  $i$  群のサンプル数である。「全分散」は全ため池のサンプルスコアの

$$\sum_i \sum_m (y_{im} - y_a)^2 / n$$

となる。群間分散は、級間分散 (鈴木, 1998; 菅, 1993)、グループ間分散 (吉田, 2006) 等とも呼ばれる。相関比は、「(群間変動) / (全変動)」でもある (田中・脇本, 1983)。「全変動」は個々のデータが全平均からどれだけ変動しているかを見る統計量であり、「群間変動」は群別平均が全体平均に対してどれだけ変動しているかを見る統計量である (菅, 1993)。

**重相関係数**：相関比の平方根も分析の精度を示し、重相関分析における重相関係数に相当する (田中・垂水, 1997)。本論では、相関比の平方根を重相関係数 (CC: Correlation Coefficient) と呼ぶことにする。

**判別率**：判別率  $H_R$  は、多変量解析によって被害・無被害と判定された各ため池が、実際の被害・無被害とどれだけ一致したかを示す指標、つまり正答率である。次式で表される。

$$H_R = N/T \times 100 \tag{2}$$

ここで、 $N$  は (1) 式により判別された、被害・無被害ため池が、実際の被害・無被害と一致したため池数、 $T$  は全ため池数である。上田 (2003) はこれを「判別率」としている。なお、この判別率の中率をとりあげている解説書は比較的少ない (菅, 1993; 上田, 2003)。

判別率の中率は、分かりやすいように見えるが問題もある。例えば Table 1 の Case10, Case11 に見られるように、5町領域 (サンプル数: 1788個) と北淡町領域 (509個) の判別率の中率  $H_R$  (表中項目3) は、どちらも同じ73.5%である (Fujii et al., 2002; 藤井・他, 2005)。しかるに、相関比 (CR)・重相関係数 (CC) は、5町領域 (0.186・0.431) と北淡町領域 (0.280・0.529) とは大きく異なる。そこで藤井ら (Fujii et al., 2000a; 藤井・他, 2005) は、基準指標として、確率的判別率の中率  $H_{RP}$  ( $H_R$  due to probability: (3) 式) を、次のような考え方で提案した。

**確率的判別率の中率**：判別率の中率は上述のように正答率である。つまり、 $T$  個のため池を、判別方程式 (1) 式により、被害 ( $d'$ ) か、無被害 ( $u'$ ) かを判定する。それらは、実際には被害 ( $d$ ) か、無被害 ( $u$ ) であるから、 $d'd$ ,  $d'u$ ,  $u'd$ ,  $u'u$  の組合せのいずれかである。この内、 $d'd$  および  $u'u$  の個数の和が正答数で (2) 式の  $N$  である。同様の考え方で、偶然に定まる正答率を算定する。本件の場合 解析時には、全サンプル数  $T$  個の内、被害ため池数  $D$  個、無被害ため池数  $U$  個であるのは分かっている。

したがって、被害ため池 ( $d'$ ) として、 $T$  個の中から適当に  $D$  個を選んだ (判別した) とする。適当に選ばれた  $D$  個のため池 ( $d''$ ) が実際に被害ため池 ( $d$ )、つまり  $d'd$  である期待値は ( $D \times (D/T)$ ) 個となる。残りの  $U (= T - D)$  個が、無被害 ( $u''$ ) ため池となるが、これが実際に無被害 ( $u$ ) つまり  $u''u$  である期待値は ( $U \times (U/T)$ ) 個となる。この場合の正答数は、 $d'd$  と  $u''u$  の和であるから、偶然に定まる正答率つまり判別率の中率は、これらを (2) 式に代入して、

$$H_{RP} = ((D \times D/T) + (U \times U/T)) / T \times 100 \\ = (D^2 + U^2) / T^2 \times 100 \tag{3}$$

となる。この  $H_{RP}$  を「確率的判別の中率」と定義した。

$H_{RP}$  は、被害数と無被害数が既知ならば、他の情報（要因等）が全くなくても、個々のため池の被害・無被害を偶然に同定できる理論的（確率的）な判別の中率である。要因を設定し、解析するからには、この「確率的判別の中率」よりも大きな判別の中率を得るべきであろう。

そこで、判別の中率と確率的判別の中率  $H_{RP}$  の比  $R_{A1}$ 、

$$R_{A1} = H_R / H_{RP} \quad (4)$$

を「相対精度」(Relative Accuracy) と定義すれば、以上の論議から  $R_{A1}$  は 1.0 を上回ることが必要となる。(3) 式からわかるように  $H_{RP}$  は、D と U との差が大きい程大きくなる。D=U のとき、 $H_{RP}$  は最小の 50%、D=0 または U=0 のとき最大の 100% となる。したがって、D と U とが異なるとき、つまり、被害率 (D/(U+D)) の異なる解析結果の判別の中率の、定量的な比較はあまり意味がないと言える。

Table 1 で判別の中率が同じ (73.5%) であった 5 町領域の  $R_{A1}$  は 1.07 (Case 10)、北淡町領域 (Case 11) の  $R_{A1}$  は 1.36 で、どちらも、最低基準 ( $R_{A1} > 1.0$ ) は満足している。しかし、(4) 式の名分  $H_{RP}$  が異なるので両者間の比較はできない。そこで、さらに相対的な指標を次のように設けた。今までの論議から、 $\Delta R_A = (H_R - H_{RP}) > 0$  であれば最低限の精度を満足していることになる。また、全てのため池の被害・無被害を正答したとき、 $H_R$  は 100% で最大となる。つまり、 $H_R$  は、 $H_{RP}$  以上が望ましく、100% を超えることはない。その範囲は  $(100 - H_{RP})$  となる。一般的には  $\Delta R_A$  はこの範囲内にある。この両者の比を  $R_{A2}$  として次のように定義する。

$$R_{A2} = \Delta R_A / (100 - H_{RP}) \times 100 \\ = (H_R - H_{RP}) / (100 - H_{RP}) \times 100 \quad (5)$$

$R_{A2}$  は一種の偏差値で、これを用いれば、異なった解析間の、相対的な精度の比較が可能となる。(4) 式の  $R_{A1}$  を「第 1 相対精度」、(5) 式の  $R_{A2}$  を「第 2 相対精度」と呼ぶことにする。上述の第 2 相対

精度は、5 町領域 (Case 10) で 15.9%、北淡町領域 (Case 11) で 42.1% となる (Table 1, Case 10・11)。判別の中率は同じでも第 2 相対精度は、北淡町領域の方がはるかによい。このように、判別の中率を用いる場合は、確率的判別の中率と共に論ずべきであろう。

なお、「レンジ」も、精度の指標とされ、次式で定義される。

$$R = A_{jk}(\max) - A_{jk}(\min) \quad (6)$$

ここで、 $A_{jk}(\max)$  は各アイテム j の CS の最大値、 $A_{jk}(\min)$  は同じく最小値である。つまり、レンジは、各アイテムの CS の範囲を表す。アイテムやカテゴリーが正しく選ばれていれば、各アイテムのレンジの大きさの順位は、偏相関係数の順位にはほぼ一致するとされる (菅, 1993)。

### 3. 野島断層領域の結果と 5 町領域との比較

#### 3.1 解析精度

前章で述べたように、本論の数量化理論 II 類の計算には市販ソフト (Excel 数量化理論 v.2, エスミ社) を用いている。一方、前論 (藤井・他, 2005) の 5 町領域の計算は、岡山大学計算機センター内蔵の SPSS (垂水, 1995) を利用した。そのアイテムも、カテゴリーも野島断層領域とは異なっている。そこで、野島 (断層) 領域のアイテム、カテゴリーに合わせて、5 町領域のサンプル (ため池) 1788 個をこの市販ソフトで再計算した。ただし、5 町領域では最近断層をアイテムとして用いている。その結果は Table 1 のように、5 町領域 (5 Town Area) 1788 サンプルについての、今回の精度 (All Items: Case 9) と、前論のもの (Case 10) とはほぼ同じとしてよい。よって以後この市販ソフトで算定した結果を用いる。なお同表には、SPSS で算定した北淡町領域 (Hokudan Area) の結果 (Fujii et al., 2000a: 藤井・他, 2005) も、参考のために Case 11 として示している。

後述 (5.3 節) のように、本論では、堤軸の法線角度 (震央角度、断層角度) が特に重要である。そこで、Case 9 (1788 個) のため池から、堤長 10

m 以上 (20 m 未満は数個) の1562サンプルを抽出し、法線角度、方位角を再確定した。このデータを用いた算定結果を Case 8として、Table 1に示す。その解析精度は、Case 9に比べ若干劣る。しかし、ダブルチェックしたデータであることを重視し、Case 8の結果を本論における5町領域の値とし、論議の対象とする。

野島領域についても、同様な手法で解析対象サンプルを確定し395 (内、被害：112) 個とした。Table 1に Case1としてその解析精度 (項目3) を示す。野島領域の「平均被害率」(DR：項目2)、つまり、領域内全ため池数に対する被害ため池数の百分率 (28.4%) は、5町領域 (Case 9：1788サンプル：19.6%、Case 8：1562サンプル：22.3%) より大きい。Table 1の項目3にみられるように、野島領域 (Case 1) の相関比 CR (0.306)、重相関係数 CC (0.554) は、5町領域 (Case 8) のそれら (CR: 0.182, CC: 0.427) より大きい。判別の中率 ( $H_R$ ) も、野島領域 (76.5%) は5町領域 (70.0%) より6.5ポイント大きい。

菅 (1993) は、相関比：0.8~1.0、判別の中率：90~100%を分析精度が「非常に良い」、同じく0.5

~0.8、75~90%を「やや良い」、0.5未満、50~75%は、「分析精度が良くない」としている。ただし、菅は、これはあくまで著者自身の目安であり、判断は (ケースバイケースで) 解析者がすべきであるとしている。一方で、古谷野 (1988) は、事例として得られた相関比0.151について、「決して大きな数ではないが、実際の調査データであれば、許容できないほどの小さな数値ではない」としている。したがって、菅 (1993) に従えば、相関比は「良くない」が、判別の中率は「やや良い」ことになる。また、古谷野 (1988) に従えば、相関比は充分評価できることになる。

一方、野島領域 (Case 1) の第1相対精度  $R_{A1}$  (1.29) は、5町領域 (Case 8：1.07) より大きい。第2相対精度  $R_{A2}$ も野島領域 (42.2%) が、5町領域 (13.5%) より30ポイント、約3倍ある。判別の中率の差は6ポイントであるが、相対精度は大きく異なる。いずれも基準値 ( $R_{A1}>1$ ,  $R_{A2}>0$ ) を十分満足している。

Fig. 3に野島領域 (Nojima A., Case 1) の偏相関係数 (Partial Correlation Coefficient: PCC) とレンジ (Range)を示した。比較のために、5町領域 (5

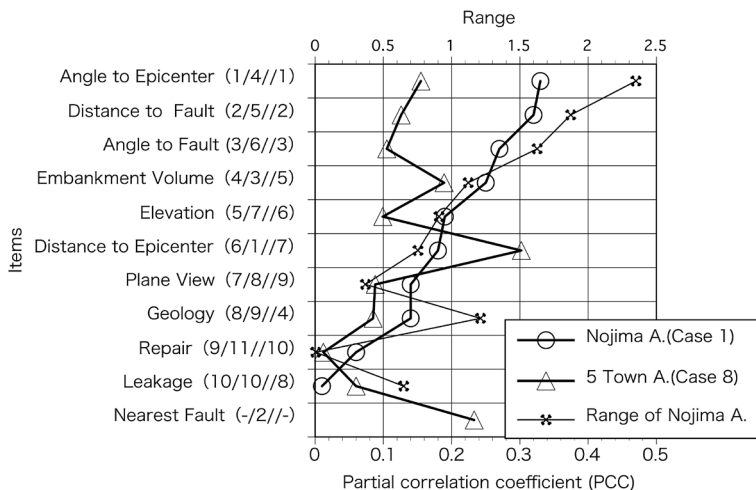


Fig. 3 Partial correlation coefficient (PCC) for the Nojima (Case 1) and 5 Town areas (Case 8) as well as range<sup>1)</sup> for the Nojima area NB. 1) cf. eq. (6), 2) The numerals in brackets show the PCC rank for the Nojima and the 5 Town areas as well as the range rank for the Nojima area, 3) 「-」: no data, 4) the cases are the same listed in Table 1.

Town A, Case 8) の偏相関係数も示している。ラベルの括弧内の1番目, 2番目の数字は, 野島断層領域と5町領域の偏相関係数の順位, 3番目は野島断層領域のレンジの順位を示している。「-」印は対応するアイテムがないことを示す。レンジと偏相関係数の順位差は, 表層地質が4位と大きく, カテゴリー分け等に問題があることを示す。しかし, これらの地質特性と被害の関係をすることは重要なので, あえてこのままにしている。その他のアイテムは, 震央角度, 断層距離, 断層角度が同順位, 堤体量, 標高, 震央距離, 改修が1位差, 平面形状, 漏水が2位差であり, ほぼ対応しているとしてよい。

### 3.2 各アイテムの被害への寄与

#### (1) 概説

本項では, 地震関連のアイテムを中心に, 各要因(アイテム, カテゴリー)の被害の関わりについて述べる。Fig. 3の, 断層距離(Distance to Fault), 断層角度(Angle to Fault)の偏相関係数(PCC)は, 野島領域では野島断層に, 5町領域では最近断層(Nearest Fault)に対するものである。参考までに同じ図に示しているが意味は異なる。したがって, 本論では断層距離・断層角度については野島領域についてのみ述べる

Fig. 4 (Fig. 4a~4j)に, 野島領域(Table 1, Case 1)・5町領域(同じくCase 8)の, 各アイテムのカテゴリースコア(CS)および被害率(DR)を示した。CSは, 前論(藤井他, 2005)同様, マイナスのCSの絶対値の大きいものを「大きい」と称する。図への表示は, 被害率と対比するため, 正負の方向を逆に表示した。ラベルの括弧内の数字は, 野島領域, 5町領域のサンプル(ため池)数である。CSの正負は, 解析結果が1群(無被害側)か, 2群(被害側)かの相対的な比較である。1群だからといって必ずしも無被害とは限らない。例えば, Fig. 4aの野島領域のCSは, 断層距離3000 m (0.47)で最も無被害側(プラス)であるが, 被害率は19.8%もあることに注意したい。

震央距離, 断層角度などの, 量的変数(定量的な, 説明変数=アイテム)の値はすべて質的変数

(カテゴリー変数)に置き換えている(2.3節)。例えば, 震央距離のカテゴリー(Fig. 4bのラベル)は3 km, 6 km, …, 30 kmまでの10カテゴリーある。この内の「3 km」は, 実距離で「3 km以上6 km未満のサンプル」を一つのカテゴリーにしている。他のカテゴリーも同様である。

断層角度, 震央角度については, 野島領域のサンプル数が少ない(395個)ので, 360度表示(36カテゴリー)ではなく, 180度表示(18カテゴリー: Figs. 4c・4d)としている。180度~360度の場合, それらの点対称の0~180度に変換して解析している。つまり360度表示の場合, 堤軸下流法線を基準としたが, 180度表示の場合, 法線の上下流の向きは考慮していないことになる。5町領域ではサンプル数は十分ある(1562個)が, 野島領域との比較のために, 本論では180度表示の解析結果を示す。

#### (2) 断層距離と震央距離

**断層距離**(野島領域のみ): 偏相関係数(PCC, Fig. 3)から, アイテムとしては2番目に被害に関わる。断層距離は, 野島断層の東側(内陸側)を正, 西側(海側)を負とした(Fig. 4a)。カテゴリーの範囲は, 海側が-500 m(実距離:-360~0 m), 内陸側が5000 m(実距離5000~6200 m)までである。被害側(CSがマイナス)は, カテゴリーの-500~1000 m未満である。CSの最大ピーク(-1.13)は500 m(実距離で野島断層より500 m以上1000 m未満の内陸側)にある。これを中心に両側へ離れる程CSは小さくなる。被害率の傾向もCSに一致している。

**震央距離**: 5町領域のPCCは1位であるが, 野島領域では6位と低い(Fig. 3)。CSの最大ピークは, 野島領域(-0.26)・5町領域(-1.64)ともに, 前論同様, 9 kmに生じ(Fig. 4b), これから両側へ離れる程CSは小さくなる。この特性は, 領域の広い5町領域によりよく表われている。被害側(CS<0)は, 15 kmと18 kmの境界(実距離18 km)までとなる。被害率の最大値も9 kmに生じているが, その傾向はCSに比べばらつく。CSは, 震央距離だけの影響を示しているのに対し, 被害

率は他の要因も含まれている。この両者の傾向の差は、震央距離以外の要因があることを伺わせる。この区域の野島断層側は震度7地帯に相当する区間がある(気象庁, 1997)。これら震央距離・断層距離については、5章でさらに詳しく検討する。

### (3) 断層角度と震央角度

**断層角度**(野島領域のみ):野島領域のPCC(偏相関係数: Fig. 3)は3位であり、被害への関与は大きい。断層角度のCS(Fig. 4c)は、100度に最大ピーク(-0.81)、80度(-0.56)に第2ピークがある。続いて20度(-0.48)から10度(-0.44)に第3ピークがあり、160度(-0.45)、40度(-0.43)にも、ほぼ同じ大きさのピークがある。このようにCSがピークを示す角度を「CSピーク角度」、あるいは単に「ピーク角度」と呼ぶ。これは震央角度(Fig. 4d)についても同様である。

なお、120度にもピークがあるがCS(0.23)は無被害側である。しかし、その被害率(DR: 32.0%)は平均被害率(28.4%)より大きい。震央角度にも同様のピーク(130度, CS: 0.02, DR: 35.5%: Fig. 4d)がある。このようなピークを「準ピーク」と呼び、斜字で示す(以下同じ表記, 5.3.(2)項)。

これら断層角度のピーク角度の内、100度と10度の差は90度である。円グラフ上では、この2角度のCSと円グラフ中心とを結ぶ、2直線は直交する。そこで、両角度の関係を「直交関係にある」、あるいは「直交」と呼ぶことにする。80度と160度とは80度差で「ほぼ直交」と言える。このことについては、5.3節でさらに詳しく検討する。

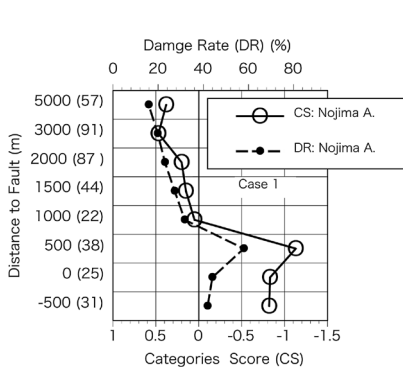
断層角度は、野島断層の法線と堤軸法線との交角としている(2.2.(3)項, Fig. 2)。野島断層を直線と見なせば、断層角度100度は、堤軸が野島断層に対してほぼ直交していることになる。また、断層角度10度は、堤軸が野島断層にほぼ正対していることになる。このように、野島領域では堤軸と野島断層とほぼ直交したため池の被害が最も多く、ほぼ正対の被害も無視できないと言える。被害率の傾向はCSの傾向と一致している。

**震央角度**:野島領域のPCCは第1位で最も被害に関与し、5町領域(4位)よりその影響が強まる(Fig. 3)。野島領域の震央角度のCS(Fig. 4d)は、10度(-1.18)を中心に、0度(-1.15)にかけて最大のピークがある。これに比べると小さいが、150度(-0.57)、30度(-0.55)、70度(-0.25)、100度(-0.17)にもピークがある。

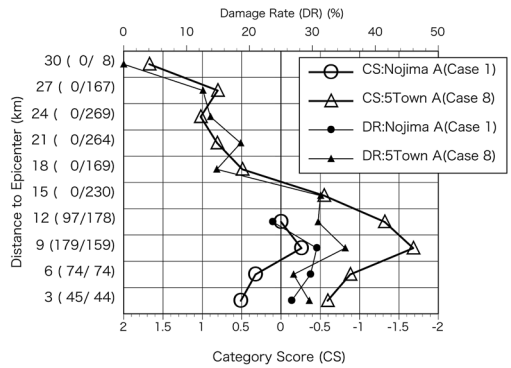
震央角度も、断層角度と同様に10度・20度と100度とには、直交およびほぼ直交関係が成立している。震央角度のピーク角度10度の堤軸は震央にほぼ正対、震央角度100度の堤軸は震央方向にほぼ直交、150(≒135+10)度はほぼ斜交(本研究の「斜交」とは「2本の直交軸x, yの中間線y = ±xの方向」とする)になる。したがって、野島領域では震央に正対しているものが最も被害を受けやすく、直交・斜交の被害も無視できないといえる。被害率の最大ピークは0度にあるが、CSの傾向は一致するとしてよい。

一方、5町領域では10度(-0.15)にピークあるが、最大ピークはCS(-0.60)も、被害率(36.1%)も100度(震央にほぼ直交)にある。野島領域とは大きく異なる。これらの震央角度・断層角度の被害の地震学的な背景については、改めて5章で検討する。

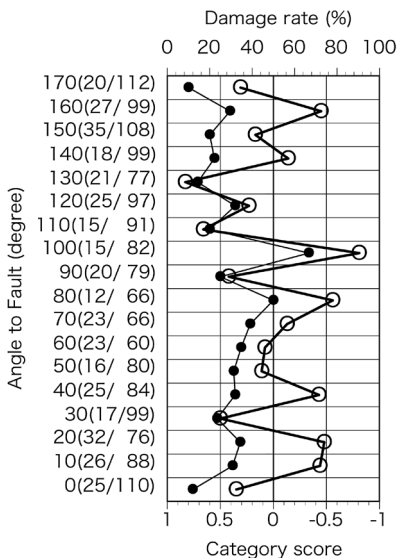
**震央角度と断層角度の関係**:1章で述べたように、震央と野島断層の位置関係から野島断層領域の震央角度と断層角度との間には相関があることが推察された。Fig. 5に、野島領域の395個のため池の、震央角度と断層角度の関係を示した。断層角度は、震央角度0度に対し60~110度の範囲にばらつくが、その平均値は約85度となる。つまり両者はほぼ直交関係(90度のずれ)にある。したがって、震央正対(震央角度10度)の被害は断層直交(断層角度100度)に対応し、断層正対(断層角度10度)が震央方向に直交(震央角度100度)に対応することになる。ただし、これだけでは、どちらが原因で被害が生じたのか、あるいは両者が関係するののかという解決にはならない。これらについては、これらの「独立性」を含め、さらに次章以降(3.4節, 6章)で検討する。



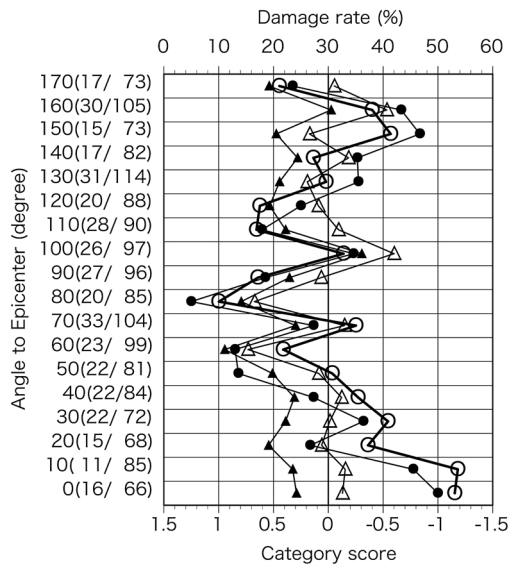
(4a)



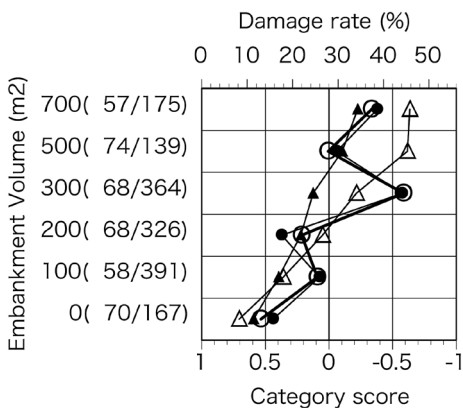
(4b)



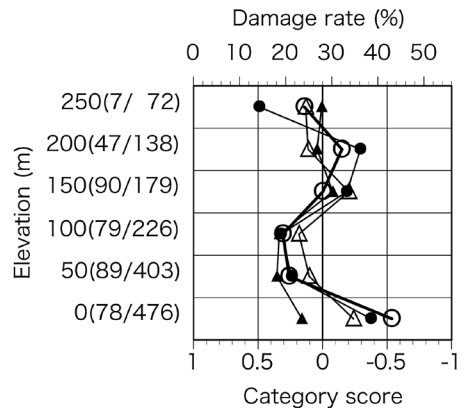
(4c)



(4d)



(4e)



(4f)

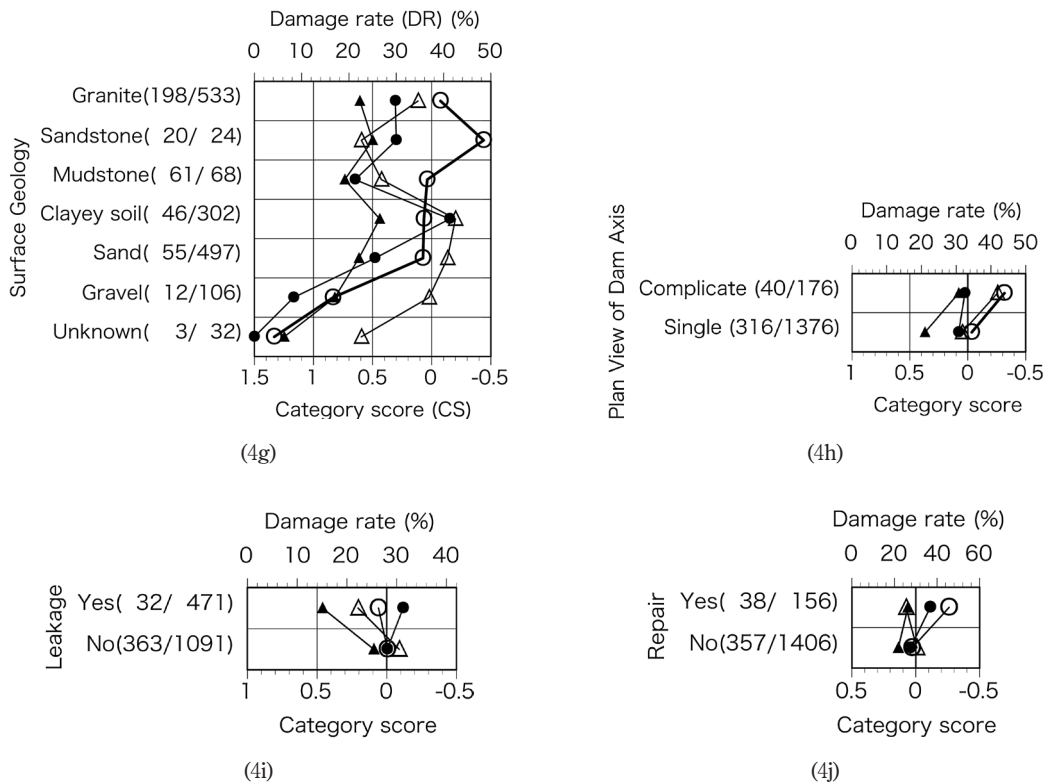


Fig. 4 Category score (CS) and damage rate (DR) for each item in the Nojima and 5 Town areas  
 NB. 1) The numerals in brackets represent the number of samples for the Nojima and 5 Town areas,  
 2) the legends shown on Figs. 4a and 4b are common for other figures of Fig. 4, 3) the cases are the same listed in Table 1.

- 4a. Distance to the Nojima fault (Nojima area only)
- 4b. Distance to the epicenter
- 4c. Angle to the Nojima fault (Nojima area only)
- 4d. Angle to the epicenter
- 4e. Embankment volume (dam height × dam length)
- 4f. Elevation of the foundation
- 4g. Surface geology
- 4h. Plan view of the dam axis
- 4i. Leakage (before mainshock)
- 4j. Repaired (before mainshock)

(4) 非地震関連のアイテム

非地震関連のアイテムの偏相関係数 (PCC, Fig. 3) は、野島領域では堤体量 (PCC: 4位), 標高 (5位) の方が震央距離 (6位) より上位にある。5町領域の非地震関連のアイテムのCSの傾向は、前論 (藤井・他, 2005) で論じたが、野島領域との比較のため簡単に記す。

堤体量 (堤高×堤長) のPCCは、非地震系のア

イテムの中では最も大きく、被害に最も関係する。そのCS (Fig. 4e) は、5町領域 (3位) で堤体量が大きい程大きいのが、野島領域では必ずしもそうになっていない。両領域とも、被害率はCSと同じ傾向を示す。両領域とも300 m<sup>2</sup>以上のCSは被害側で、被害率も平均 (28.4%) より高い。

種々の大きさのため池の弾塑性3次元モデルに、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の地

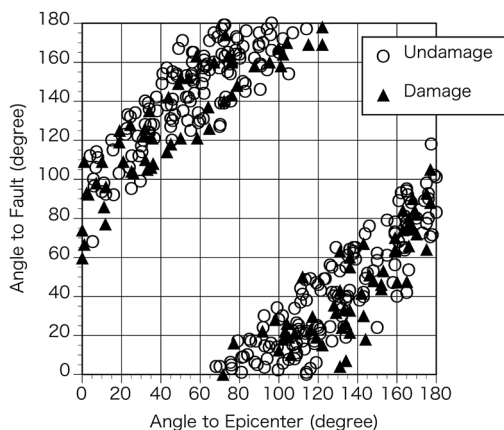


Fig. 5 Relationship between angles to the epicenter and to the Nojima fault for each dam in the Nojima area

震波を作用させると、堤体量が大きい程、塑性域の割合が大きくなる（藤井・他、2000b）。工学的には、この現象は起こりうると言える。

標高（PCC、野島領域：5位、5町領域：7位）のCS（Fig. 4f）の1位は0mで、野島領域と5町領域は一致する。2位は200m（野島領域）と150m（5町領域）で1カテゴリーずれる。被害率はCSと同じ傾向を示す。このように、低標高部と共に、高標高部の被害が大きい傾向は、新潟県中越地震による長岡地域のため池にも見られた（藤井・他、2009：2010）。今後の検討を要する。

Fig. 4gの表層地質（PCC、野島領域：8位、5町領域：9位）において、野島領域・5町領域の砂岩系（Sandstone）の被害率（30%・25%）は、それぞれの平均被害率（28.4%・22.3%）を超えている。一方、砂岩系のCSは野島領域（-0.48）で被害側だが、5町領域（0.60）では無被害側になる。両領域において泥岩系（Mudstone）、礫質土系（Gravel）のCSは無被害側で、被害率も平均被害率より小さい。5町領域では粘性土系（Clayey Soil：-0.20）、砂質土系（Sand：-0.13）のCSは被害側だが、野島領域ではわずかに無被害側（0.074と0.064）となっている。花崗岩系（Granite）は、野島領域が被害側、5町領域が無被害側になっている。被害率は粘性土系が最大であり、CSの傾向とやや異なる。CSが表層地質だ

けの影響を示しているのに対し、被害率が他の要因も含まれていることの差といえよう。表層地質が、直接被害に関係する可能性もあるが、堤体材料の影響が考えられる。築堤用土の土取場（特に古いため池の）は、ため池近傍にある（筈だ）から、母岩の風化物が主体となるからである。これについては、さらに現地調査の堤体土性の結果と共に検討する必要がある。

堤軸の平面形状（Fig. 4h）（PCC、野島：7位、5町：8位）は、両領域とも当然とはいえ、多軸（Complicate：皿池、彎曲した堤軸等、堤軸が直線でないもの）の方が、単軸（Single：堤軸が直線のもの）より被害は大きい。

地震前の漏水状況（Fig. 4i）（PCC、野島：10位、5町：10位）は、CSでは両領域とも、台帳上の「漏水なし」が僅かだが被害側になっている。これは山深いため池などでは漏水状態の判定が難しかったのではないかと考えられる。

地震前の「改修あり」（Fig. 4j）（PCC、野島：9位、5町：11位）のCSは、5町領域では無被害側だが野島領域では被害側となる。

非地震関連アイテムのカテゴリーの傾向が、5町領域と野島領域とに違いがあるのは、地域性の差異と共に、サンプル数の差（5町領域：1562個、野島領域：395個）が考えられる。したがって、非地震関連アイテムの被害の傾向は、5町領域の結果がより全体の傾向を示しているとすべきであろう。

##### (5) 被害・無被害堤体の土質特性と多変量解析

採取した被害・無被害堤体土のサンプル数が少ないので、本論では、堤体土の土質アイテムおよびそれをを用いた多変量解析については論じていない（2.1節、2.2.（2）項）。しかし、堤体土の土質特性は、地盤工学的に、被害・無被害に関わる重要な要因である。そこで、既発表の文献（藤井・他、1998b；2004b；2014；2016）から、被害・無被害堤体の土質特性、およびそれらを用いた多変量解析の試みについて簡単に紹介する。

多変量解析を考慮した被害・無被害堤体の土質：被害・無被害堤体土の、土粒子密度・含水比・



貫入抵抗・粒度試験ならびに土質分類を行なった(2.2. (2) D 項)。それぞれの土質アイテムについて、多変量解析結果(藤井・他, 1996; 1997a; 1997b)を参考に、大きく被害に関与する、「震央距離」および「堤体量」がほぼ同一の被害・無被害ため池の組合せを作った。ただし、各土質アイテムの使用可能サンプル数は、下記のように差異があった。

被害・無被害堤体の、土粒子密度(サンプル数  $n=52$ , 被害  $d:26$ , 無被害  $u:26$ )の平均値(2.664・2.657  $\text{g}/\text{cm}^3$ )は同じとしてよい。また、含水比( $n=50$ ,  $d:25$ ,  $u:25$ )の両堤体の平均値(9.4・13.0%)は被害堤体土が3割小さい。含水比を6%ごとの4カテゴリー( $w0$ ,  $w6$ ,  $w12$ ,  $w18$ )に分けたとき、含水比が小さいほど被害率が大きくなる。 $w0$  (68.8%)の被害率は $w18$  (22.2%)の約3倍になる。

三角座標法大分類(土質工学会, 1990; 地盤工学会, 2009)により、堤体土( $n=70$ ,  $d:35$ ,  $u:35$ )は砂質土・細粒土・礫質土に分別された。この順で被害率(51.8・44.4・40.0%)は小さくなるが、その最大・最小の差は12ポイントにすぎない。そこで、細粒分(F), 砂分(S)のみに基づく「FS分類法」を提案し(藤井・他, 2014; 2016), 次の3種類に分類して被害率を求めた。「砂質系土」( $S>50\%$ ,  $F\leq 50\%$ )・「細粒系土」( $S\leq 50\%$ ,  $F>50\%$ )・「礫質系土」( $S<50\%$ ,  $F<50\%$ )の被害率(61.9・44.4・26.3%)の最大・最小の差は35ポイントになる。三角座標法(12ポイント)比べ、大きく差別化できる。

貫入抵抗による堤体強度( $n=70$ ,  $d:35$ ,  $u:35$ )の平均値は、被害堤体(223kPa)が無被害堤体(329kPa)より3割以上小さい。200kPaごとの3カテゴリー( $q0$ ・ $q200$ ・ $q400$ )の、被害率(73.7・36.4・28.6%)は、 $q0$ が $q200$ の約2倍、 $q400$ の約2.5倍となる。

弾性波探査による、堤体( $n=10$ ,  $d:5$ ,  $u:5$ )の「堤頂から基盤までの深度」は、被害・無被害ため池とも、5~70mと大きくばらつく。しかし、その平均深度(31.3・19.3m)は、被害ため池が無被害ため池より約10m深い(藤井・他,

1998b)。

**土質アイテムを用いた多変量解析**: サンプル数が少ないという懸念もあったが、上記土質アイテムを用いた多変量解析( $n=77$ ,  $d:40$ ,  $u:37$ )を試みた。現地調査した被害・無被害ため池は、震央からほぼ同位置、同規模のものを選んで(2.1. (d) 項)。したがって、震央距離・震央角度・標高・表層地質・堤体量は、被害・無被害ため池ともほぼ同一と見なせるとした。これらを用いて解析するとマルチコが生じた(3.4. (2) 項)。

そこで、解析には、土粒子密度を除く3土質アイテム(含水比, 土質分類, 貫入抵抗), および5文書アイテム(断層距離, 断層角度, 平面形状, 改修, 漏水)の計8アイテムを用いた。また、比較のため5文書アイテムのみの多変量解析も行った。前者を含土質解析, 後者を非含土質解析と呼んでいる。

**含土質解析と非含土質解析結果**: 含土質・非含土質解析の解析精度は、相関比(0.72・0.51), 判別的中率(96.1・86.1%), 相対精度  $R_{A2}$  (92.2・72.1%)ともに、含土質解析の方が精度はよい。各アイテム間の独立性を示す、各アイテム間の(クラメールの)連関係数(量的変数の相関係数に相当。3.4 (1) 項)はいずれも0.4以下であり、各土質アイテムと文書アイテム間の独立性は保たれていた。また、断層距離・断層角度のカテゴリー(5・9カテゴリー)は、サンプル数が少ないので野島領域(8・18カテゴリー)に比べ1/2前後に集約している。また、ここでの土質分類は三角座標法を用いている。

含土質解析の偏相関係数は、断層距離(0.67), 貫入抵抗(0.60), 断層角度(0.53), 含水比(0.41), 平面形状(0.38), 土質分類(0.28), 漏水(0.15), 改修(0.04)の順であった。土質アイテムとしては、貫入抵抗が最上位だが、全体としては断層距離と断層角度の間に位置する。野島領域(Case 1)における、断層距離・断層角度の偏相関係数の順位は、2・3位である(Fig. 3)。上述のように、断層距離・断層角度と貫入抵抗の独立性は保たれていたから、貫入抵抗は野島領域全体としても、上位にあると考えてよい。

非含土質解析でも、断層距離が最も被害に関係する。また、含土質解析の文書アイテムと、非含土質解析（文書アイテムのみ）の各アイテムのCSの傾向は一致した。そしてさらに、これらの断層距離・断層角度のCSの傾向（ $n=77$ ）は、野島領域（Figs. 4a, c）の対応する各アイテムのCSの傾向（ $n=395$ ）と合致した。含土質解析は、非含土質解析に比べ解析精度は上昇するが、断層角度、断層距離の被害の傾向は、文書資料のみの場合と変わらない。すなわち、堤体用土特性の有無は、文書アイテムのみで被害状況を論じた、本論の論議には関与しないと言える。

### 3.3 震央距離・震央角度を外した解析および方位角を用いた解析

#### (1) 震央距離および震央角度を外した場合—将来予測の可能性

地震はいつどこでおきるかわからないし、その震央を予測する事は難しい。しかし、特定の断層を仮定すれば、本手法を用いてある程度の被害予測は可能である。つまり、本手法で震央距離・震央角度の震央関連の2アイテムを取り去った場合に相当する。また、非地震関連のアイテムは、各ため池について収集できる。そこで、野島断層について、「震央距離・震央角度なし」（Table 1, Case 3, w/o AE & DE）を計算し、「全項目」（All Item: Case 1）と比較する。

解析精度をTable 1の項目3に示した。「震央距離・震央角度なし」の相関比（CR：0.235）は、「全項目」（0.306）より以上2割低い。重相関係数（CC：0.484）でいえば、「全項目」（0.554）より約1割低くなる。また、判別の中率（ $H_R$ ：70.9%）も、「全項目」（76.5%）に対して6.5ポイント、約0.7割下がる。第2相対精度  $R_{A_2}$ （28.4%）も「全項目」（42.2%）に比べ14ポイント約3割下がる。しかし、100個ため池があると、その内の71個の被害・無被害を判定でき、かつ基準値を満足している事になる。前項で述べたように、これに、堤体材料の現地調査データを加えれば、さらに予測精度は上がる。また、Fig. 4c および後述する（5.3節）地震学的考察から、断層近傍で、断層に対し直交

（断層角度90度）、正対（同0度）、および斜交（同45度/135度）の堤体が、他の向きの堤体より被害を受けやすいと言える。

#### (2) 方位角を考慮した場合

堤体の固有の値ともいうべき、堤軸法線の方位角（Azimuth, AZ）を用いた解析も行なった。震央位置あるいは堤体が変わると、震央角度の基準線が変わるが（4・5章）、（堤軸法線）方位角はその影響を受けないからである。

方位角を用いた多変量解析は、Table 1のCase 4からCase 7の4ケースである。すなわち、方位角と共に震央角度・断層角度を用いた場合（Case 4：AZ All）、震央角度を除いて方位角と断層角度を用いた場合（Case 5：AZ w/o AE）、断層角度を除き方位角と震央角度を用いた場合（Case 6：AZ w/o AF）、震央角度・断層角度を除いて方位角のみを用いた場合（Case 7：AZ w/o AE & AF）である。これら4ケースを「含方位角」と呼ぶことにする。解析精度の全指標はいずれも、AZ All（Case 4）がTable 1の各ケースの中では最も高い。しかし次節で述べるように独立性に問題がある。その他の3ケース（Case 5, 6, 7）の解析精度は、Case 1の全項目（All）には劣る。

Fig. 6に、Case 7（AZ w/o AE & AF）の野島領域および5町領域の、（堤軸法線）方位角のカテゴリースコア（CS）と被害率を示した。ラベルの表記は、他の角度の図と異なり、縦軸の最上部を0度（北）として表している。野島領域・5町領域ともに、CSのピークは、10・30・50・110・130・150度にある。被害率もほぼ同じである。方位角50度は野島断層の走向のN52°E（武尾, 1998）に該当する。これらについては、さらに5章で論ずる。

### 3.4 震央角度と断層角度の独立性の検出

#### (1) クラメールの連関係数

Fig. 5に見たように、震央角度と断層角度には緩やかな相関がある。したがって、1章で提起した、震央、断層の「両方共に被害に関わった」のか、あるいは「いずれか一方のみが被害に関わり、

両者の相関性から、他方が結果的に被害に関わったように見える]のかという問題が残る。これを、統計的に吟味するには、この両アイテムの独立性の検定をおこなえばよい。

本論のような質的変数の両アイテムの相関性は、クラメールの連関係数 (Coefficient of Association, 以下連関係数と記す)  $r_c$  で表される (菅, 1993; 2006)。これは量的変数間の相関係数に相当する。Table 1の項目5に、各ケースの、2角度間の連関係数  $r_c$  を示している。

震央角度・断層角度間の連関係数  $r_c$  (AE & AF) は、Case 1 (All: 全項目), Case 4 (AZ All: 含方位角で全項目)とも0.391である。震央角度・方位角間 (AE & AZ) の  $r_c$  は、Case 4, Case 6 (AZ w/o AF: 含方位角で断層角度なし)とも0.464と大きくなる。さらに、断層角度・方位角間 (AF & AZ) の  $r_c$  は、Case 4, Case 5 (AZ w/o AE: 含方位角で震央角度なし)とも0.525となる。

菅 (2006) は、連関係数の統計的基準はないとしながら、目安として、0.25以上0.5未満は「やや強い相関」、0.5以上0.7未満を「強い相関」としている。そして0.5以上のとき、解析上、マルチコ (多重共線性: Multicollinearity) と呼ばれる不具合が生じ、解析不能あるいは解析結果に誤りであるので、

どちらかのアイテムを外すべきとしている。また石村 (1992; 2006) は、0.2~0.4を「やや相関あり」、0.4~0.7を「かなり相関あり」としている。

これらの基準に照らすと、野島領域の震央角度・断層角度間 (AE & AF:  $r_c=0.391$ ) には、「やや強い」あるいは「かなり」相関があるが、どちらかのアイテムを外すほどではないことになる。それぞれが意味を持ち、被害に関わるアイテムになっていることを示す。この地震学的な検討は5章で行なう。

一方、断層角度・方位角間の  $r_c$  (AF & AZ: 0.525) は、0.5を越えている。方位角を含む全項目の解析 (Case 4) は、精度はよく見える (Table 1, 項目5) が、誤った条件で計算したことになる。また、震央角度・方位角間の  $r_c$  (AE & AZ: 0.464) も0.5に近い。つまり、方位角をアイテムとして用いる場合は、他の法線角度と一緒に用いてはならないことになる。

(2) マルチコの検定

マルチコの発生のチェックは、CS (カテゴリースコア) と被害率を比較して行なう (菅, 1993; 2006)。両者の傾向が相反するとき、マルチコが発生したとされる。具体的には、各アイテムのCSと被害率 (DR) の間の単相関係数 (SCC: Single Correlation Coefficient, Table 1, 項目6) が0.5以下の時、両者に相関がなくマルチコが起こったとしている。

Case 1, 2, 4, 6の震央角度 (項目6のAE欄) およびCase 1~5の断層角度 (項目6のAF欄) の単相関係数は0.75以上あり、マルチコは起こっていない。「含方位角」 (With Azimuth) (AZ欄) の場合、Case 7の震央角度・断層角度なし (AZ w/o AE & AF) のCSと被害率との相関は強い (SCC:0.941)。一方Case 4 (AZ All) は、両者間の相関は極めて小さく (SCC: 0.122)、どちらかのアイテムを外す必要がある。方位角と断層角度 (Case 5, SCC: 0.538)、または震央角度 (Case 6, 同: 0.599) と組み合わせたものも、0.5以上はあるがCase 7に比べると大きいとはいえない。これらの検討から震央角度と断層角度は、Fig. 5の

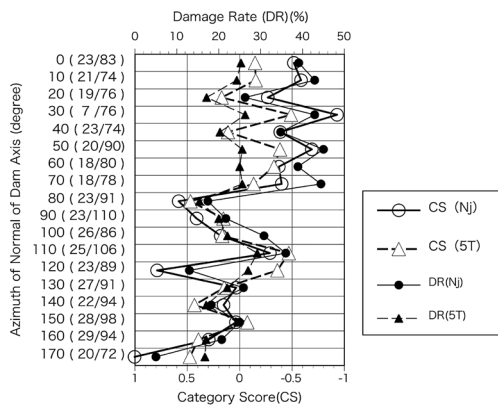


Fig. 6 Category score (CS) and damage rate (DR) for the azimuth of the normal to the dam axis (AZ) (Case 7)  
NB. 1) Numerals in brackets are the number of samples for the Nojima and the 5 Town areas, 2) AZ: azimuth,  $\theta_A$  cf. Fig. 2, 3) cf. Fig. 4.

ように相関があるものの多変量解析上は、それぞれが独立して被害に関わる言える。この意義は大きい(5・6章)。

## 4. 震央位置と多変量解析結果

### 4.1 震央位置

本研究で用いている震央位置は、気象庁(1997)発表の概略値(JMA97bと略記：34°36'N, 135°02'E)に基づいている(2.2.(2)項)。この位置を図上で同定、国家座標に変換し、震央として用いていた(Fujii et al. 2000a; 藤井・他, 2002; 2005)。今回、この座標値を経緯度に再変換の結果(34°36.4'N, 135°02.6'E)、緯度で0.4'(約400m)、経度0.6'(約900m)のずれが判明した。同庁発表(気象庁, 1997)の精密値(JMA97a: 34°35.7'N, 135°02.3'E)とも、緯度で0.7(約1300m)、経度で0.3(約500m)異なる。概略値としての許容範囲とも考えられたが、この震央のずれが解析結果に影響した可能性もある。そこで、この震央のずれを修正したデータについて計算した。これと共に、震央として公表された、他のいくつかの座標についても検討した。

Fig. 1には、気象庁(1995)の当初の値(JMA95: 34°35.6'N, 135°00.1'E, 図中①, 以下同じ)、同(1997a)精密値(JMA97a: 34°35.7'N, 135°02.3'E, ②)、同(1997b)概略値(JMA97b, 34°35'N, 135°02'E, ⑥)、阪神・淡路大震災調査報告編集委員会(1998)の値(CRHAE: 34°36.6'N, 135°02.1'E, ③)、国立天文台(2003)の値(NAOJ: 34°35.4'N, 135°02.4'E, ④)、米国地質調査所(菊地: 1998)の値(USGS: 34°34.8'N, 135°01.2'E, ⑤)の概略位置を丸数字で示した。これらには精粗があり、かつ公表が後のものがより正確であると思われたが参考値として示した。

なお、本研究で用いていた震央位置を「現震央」(Current: 34°36.4'N, 135°02.6'E; 図中☆印)と呼ぶことにする。現震央とこれらの震央の座標との最大差は、西より約4km(JMA95①)、南より約3km(USGS⑤)である。距離差は最大4.1km(JMA95)であり、JMA97a②とは1.4km離れている。JMA95①・USGS⑤はやや離れるが、他は

現震央近傍にあると言える。

### 4.2 震央変更による解析結果への影響

上記6震央の内、現震央と距離差の大きいJMA95①, USGS⑤, および代表的と思われるJMA97a②を新たな震央とし、数量化理論Ⅱ類による解析を行なった。なお、丸数字はFig. 1記載の位置と一致する。これらの解析における、震央距離、震央角度以外の、アイテム、カテゴリーは現震央と同じである。

Table 2に、この3ケースの相関比(CR)、重相関係数(CC)、判別の中率( $H_R$ )、第1・第2相対精度( $R_{A1}$ ・ $R_{A2}$ )を示した(2.4節)。比較のため現震央(Current)の値も斜字で示している。確率的判別の中率( $H_{RP}$ : 59.4%)はTable 1のものと変わらない。現震央(Current)と比べると、USGS⑤の相関比(差0.018, 約0.6割)、重相関係数(差0.016, 約0.3割)はややよいが、他の項目他のケースの解析精度はいずれも劣る。第2相対精度 $R_{A2}$ は、現震央が42.2%で最も大きく、JMA97a②は39.5%で2位である。つまり、現震央に対する各解析精度の数値は、USGSの震央(JMA97a②より最も離れた位置)に対する相関比、および(その平方根の)重相関係数の2数値を除けば最も大きい。

断層距離・断層角度のカテゴリースコア(CS)の傾向は、いずれの震央も現震央と殆ど変わらなかった。ここでは、震央距離・震央角度のCSについて述べる。

**震央距離**: Fig. 7aに、上記3震央と現震央による震央距離のCS(カテゴリースコア)を示した。図右欄の括弧内の数字は、凡例の各ケース順のサンプル数である。JMA97aは、現震央(Current)と同様にピークが9kmにある。JMA95とUSGSは、震央が南西に4km前後下がるので、ピークも6kmに移る。いずれも震央から離れた位置で最大被害となることは変わらない。

**震央角度**: Fig. 7bに、震央角度のCSを、Fig. 7aと同様の表記で示した。現震央から約4km南西に離れているUSGSには、現震央と同じく、最大ピークが10度にありこれを含めピークは5個

ある (Fig. 7b)。西南西方向へ約 4 km 離れている JMA95は震央角度 0度が最大ピークでピークは 7 個ある。現震央から南南西方向へ約 1 km 離れている JMA97a は、20度 に第 2 ピークがあるが、最大ピークは 150度 にあり、他の震央とは異なる。しかし、ピークは 7 個あり、その内 6 角度

が現震央のピーク角度とほとんど一致する。このように、震央位置がある程度ずれても、震央距離では基本的なパターンはあまり変わらない。ただし、震央角度については、現震央と約 4 km 離れた JMA95・USGS とではピーク数、ピーク位置にずれが生じる。

現震央は、確定した震源である JMA97a ②より、約 1.4 km 離れた位置にあることになる。しかし現震央の解析結果は、USGS (JMA97a ②より西南に約 2.5 km の位置) の相関比・重相関係数を除いて最も精度が高く (Table 2)、震央距離・震央角度の傾向も JMA97 とほぼ一致する。したがって、現震央の解析結果がより現状に近いとして論ずる。

Table 2 Accuracy of the analyses for four different epicenters of the mainshock

| Abbr. <sup>1)</sup>           | Epicenters <sup>2)</sup> |       |       |         |
|-------------------------------|--------------------------|-------|-------|---------|
|                               | JMA95                    | JMA97 | USGS  | Current |
|                               | ①                        | ②     | ⑤     | ☆       |
| CR                            | 0.285                    | 0.303 | 0.324 | 0.306   |
| CC                            | 0.534                    | 0.551 | 0.570 | 0.554   |
| H <sub>R</sub>                | 73.6                     | 75.4  | 74.7  | 76.5    |
| R <sub>A1</sub> <sup>3)</sup> | 1.24                     | 1.27  | 1.26  | 1.29    |
| R <sub>A2</sub> <sup>4)</sup> | 35.0                     | 39.5  | 37.7  | 42.2    |

NB.1) The abbreviations are the same listed in Table 1, 2) The epicenters correspond to those in Fig. 1, 3) cf. eq. (4) with H<sub>RR</sub>=59.4%, 4) cf. eq. (5)

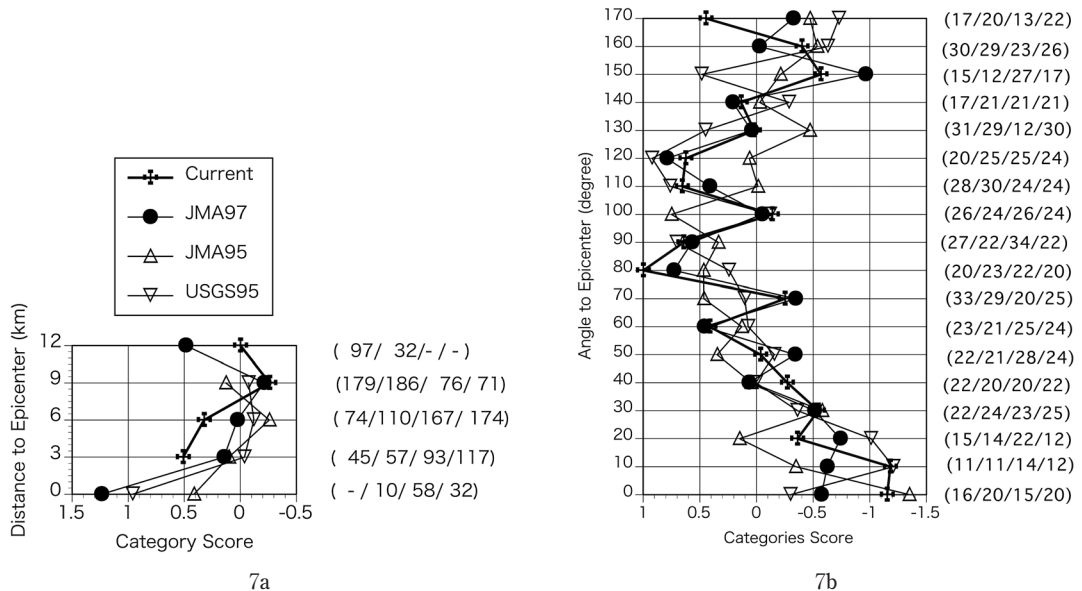


Fig. 7 Category score (CS) for the distance and angle to epicenter calculated for the four mainshock epicenters

NB.1) The numerals in brackets indicate the number of samples for the four mainshock epicenters in the legend, 2) the brevity codes in the legend are the same as those in Fig. 1.

7a. Distance to the epicenter

7b. Angle to the epicenter

## 5. 多変量解析結果の地震学的解釈の試み

### 5.1 解析結果に対する地震学の成果の適用

#### (1) 震源過程解析の適用—震央および断層の被害への関わり

本章では、地震関連アイテムの多変量解析の結果(3章)が、地震学的に説明可能かどうかを検討する。手法は、兵庫県南部地震および標準的な地震学に関する文献に基づく、定性的な考察である。必要に応じて多変量解析を追加した。

被害への関わりを表す偏相関係数は、野島領域では震央角度が最大で、断層距離、断層角度と続く。また、5町領域では震央距離が最大であった(Fig. 3, 3.2. (2)・(3)項)。つまり震央に関わるアイテムも、断層に関わるアイテムも大きく被害に関係することを示す。地震学的にこのようなことが言えるのであろうか。また、本研究の震央距離・震央角度は震央を基準にしている。震源は断層破壊の開始点であり、必ずしも最大地震波の発震点とは言えない。そして、本研究の震央つまり現震央の問題もある(4.1節)。これらのことについて、各種文献の震源過程解析結果を援用して論議する。

**震源過程解析例:**兵庫県南部地震の震源断層の、震源過程の解析については、多くの研究成果が公表され、取纏められている(額額, 1998; 橋本, 1998; 武尾, 1998; 菊地, 1998; 釜江, 1998; 釜江, 2005; 工藤, 2005)。解析は、地震波等の多くの観測データを用い、逆解析(インバージョン)を行い、野島断層を含む断層の震源過程を求めている。

これらの最終すべり量の分布は、地形図の等高線のような、等すべり量線図として描かれている。いずれのモデルも、仮定された断層面の殆ど全域ですべりが生じ、複数( $n$ )個のピークがある。このピークの中心を $An$ とし、 $An$ を中心とする大すべり領域を「 $An$ 領域」と呼ぶことにする。

上記諸文献より10モデル(M①・②・③・④・⑤, 武尾, 1998; M⑥, 菊地, 1998; M⑦・⑧, 額額, 1998; M⑨・⑩, 工藤, 2005)のすべり分布から、各モデルそれぞれの主要なすべり( $An$ )領域( $n = 1 \sim 3$ , すべりの大きい順。 $n = 3$ のないモデ

ルもある)の概略を読み取り Table 3に示す。

表の各列に、アルファベット(a~n)を付した。モデル番号(No: a列, 以下「列」省略)は、他項の「①」との混同を避けるため「M①」のようにMを付した。各モデルは、仮定断層面(Assumed Fault Planes: b~d)を1~5面設定している(Number of Fault Planes: b)。各モデルの震央より淡路島側の、仮定断層面(Awaji Side Plane: c, d)はいずれも1面あるいはその一部(M①)である。M⑥は、他のモデルと異なり、仮定断層面を設定していない。断層上のすべりの大きい部分を3個の点震源で近似し、推定したモーメントに適合する3枚の断層面を同定している(菊地, 1998)。これらの淡路島側の仮定断層断面(c, d)の、地表面上の長さ(Length: c)および深さ方向の幅(Width: d)を示した。

各モデルの震央(「モデル震央」と略記)の概略位置(Location of Epicenter: e, f)を、淡路島最北端(NPA: Northernmost Point of Awaji Island, Fig. 1: 34°36'33" N, 135°00'08" E: 国土地理院 HP (2007))を基準にして同定した。NPAから、モデル震央への距離(e, f)は、東(Eastward: e)へ1~4 km(内8モデルは3または4 km)、南(Southward: f)へ0または1 kmである。

つづいて、モデル震央から $An$ までの、野島断層に沿った距離(Dist.: g, i, k)を示した。すなわち、第1(最大: $A_1$ ) (Largest Slip: g)・第2( $A_2$ ) (Second one: i)・第3( $A_3$ ) (Third one: k)すべり領域の中心(つまり $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3$ )までの、モデル震央からの距離である。マイナスが淡路島側となる。なお多変量解析では、これとは逆に、震央より南をプラスとしている。本論文では表記はそのままにし、数値を読み替えている。モデル震央から $A_1$ までの距離(g)は、-12~2 kmであり、その内、4モデル(M④・⑥・⑦・⑧)の $A_1$ はモデル震央から0~2 kmである。

また、 $An$ の地表からの深さ(Depth: h, j, l)も示した。 $A_1$ の地表からの深さ(h)は0~14 kmである。最後(m, n)に、各モデルの最大すべり( $A_1$ )領域(Region of Largest Slip)の長さ(Length: m)、深さ方向の幅(Width: n)の値を示している。

Table 3 Outline of slip spatial distribution along the Nojima Fault obtained from previously published studies

| Model <sup>1)</sup> | Assumed Fault Planes |             |            | Location of Epicenter  |                | Location of Center <sup>3)</sup> of Large Slip Regions (A <sub>n</sub> ) |            |                              |            |                             |            | Largest Slip Region (A <sub>1</sub> ) |            |
|---------------------|----------------------|-------------|------------|------------------------|----------------|--|------------|------------------------------|------------|-----------------------------|------------|---------------------------------------|------------|
|                     | Number of Planes     | Awaji Side  |            | From NPA <sup>2)</sup> |                | Largest Slip (A <sub>1</sub> )   |            | Second one (A <sub>2</sub> ) |            | Third one (A <sub>3</sub> ) |            |                                       |            |
|                     |                      | Length (km) | Width (km) | Eastward (km)          | Southward (km) | Dist. (km)   | Depth (km) | Dist. (km)                   | Depth (km) | Dist. (km)                  | Depth (km) | Length (km)                           | Width (km) |
| a                   | b                    | c           | d          | e                      | f              | g  | h          | i                            | j          | k                           | l          | m                                     | n          |
| M①                  | 1                    | 18          | 20         | 3                      | 1              | -7   | 0          | 24                           | 16         | —                           | —          | 5                                     | 4          |
| M②                  | 3                    | 22          | 22         | 3                      | 1              | -8   | 0          | 5                            | 16         | 20                          | 18         | 4                                     | 3          |
| M③                  | 2                    | 15          | 15         | 4                      | 0              | -5   | 0          | 21                           | 13         | —                           | —          | 2                                     | 3          |
| M④                  | 2                    | 26          | 15         | 4                      | 1              | 1  | 12         | -5                           | 2          | 8                           | 12         | 5                                     | 2          |
| M⑤                  | 2                    | 20          | 20         | 1                      | 1              | -5   | 4          | 6                            | 14         | —                           | —          | 10                                    | 6          |
| M⑥                  | (3)                  | 12          | 12         | 3                      | 0              | 0  | 8          | 20                           | 8          | 15                          | 8          | —                                     | —          |
| M⑦                  | 5                    | 16          | 16         | 3                      | 0              | 2  | 13         | -11                          | 8          | 9                           | 13         | 2                                     | 2          |
| M⑧                  | 4                    | 24          | 16         | 3                      | 0              | 2  | 14         | -11                          | 5          | -8                          | 13         | 2                                     | 2          |
| M⑨                  | 5                    | 21          | 20         | 4                      | 1              | -12  | 0          | 0                            | 15         | 18                          | 18         | 5                                     | 5          |
| M⑩                  | 4                    | 21          | 20         | 2                      | 1              | -12  | 3          | 16                           | 19         | 0                           | 15         | 5                                     | 3          |

NB. 1) M①: Ide et al. (1996), M②: Sekiguchi et al. (1996), M③: Horikawa et al. (1996), M④: Yoshida et al. (1996), M⑤: Wald (1996), M⑥: Kikuchi (1998), M⑦: M⑧: Koketsu (1998), M⑨: Sekiguchi et al. (1998), M⑩: Yamada et al. (1999). 2) NPA: the northernmost point of Awaji Island (34° 36' 33" N, 135° 00' 08" E) shown in Fig. 1, 3) Location of Center: the distance and depth of An from the epicenter of each model.

A<sub>1</sub>領域の大きさ(長さ×幅)は、小さいものが2km × 2 km (M⑦・⑧)、大きいものが10 km × 6 km (M⑤)である。

**現震央から A<sub>1</sub>までの距離 - As の設定**：本研究に用いた震央(つまり現震央)の経緯度は34° 36.4' N, 135°02.6' Eである(4.1節)。「NPAからの現震央への距離」は、東へ4km, 南へ0 kmとなる。これと、各モデルの「NPAからモデル震央までの距離」(e, f)との差は、東方向(=e-4)へは大半が、南方向(=f-0)へは全モデルが1 km以内である。Table 3のモデル震央から An への距離(g, i, k)は、野島断層(直線とみなすと N40°E, 水平軸に対して E50°N)に沿った距離である。南方向1 km (f)の、断層上の距離は若干長くなる(1/sin50° ≃ 1.3)。この差を無視すると現震央から A<sub>1</sub>までの距離は、-13~2 km (=g-f)となる。その内、4モデルが0 (M④・⑥)または2 km (M⑦・⑧)である。これら4モデルの A<sub>1</sub>の東西方向のずれ(=e-4)は0 (M④)または-1 km (M⑥・⑦・⑧)となる。

これらのことから、本論において「現震央の近傍に大地震波の発震点がある」と仮定したことは許されよう。この震央付近の大地震波の発震点を

「As」とし、以後「As ≡ 震央(現震央)」として扱う。Asを中心とする領域を「As領域」と呼ぶことにする。これらについては、5.3.(3)項で改めて論議する。

すべり量が大きい程、大きな地震波を発生する(次項)。したがって、野島断層全域から地震波を発生し、その中でも特に大きな地震波が As 領域から射出されたことになる。結果的に震央に関わるアイテムも、断層に関わるアイテムも、それぞれ被害に関与することになる。震央も断層も、被害に大きく関わっているという多変量解析の結果は、地震学の解析結果と矛盾しない。

(2) 地震波エネルギーおよびダブル・カップルモデル

震央距離の最大被害は、野島領域も5町領域も、震央から9 kmとかなり離れた位置で生じていた(Fig. 4b)。このような現象は、2004年新潟県中越地震(藤井・他, 2009; 2010)、2007年能登半島地震(藤井, 2008)、2016年熊本地震(藤井, 2018)によるため池堤体被害にも見られた。

菊地(1996)は、兵庫県南部地震の震源からの

地震波エネルギーの分布を算定して図示し、放射特性の重要性にふれている。すなわち、「これは、各方向（水平方向）へ放出されるエネルギーの大きさを、その方向の動径の長さとして表示したものである」とし、「北東-南西方向（野島断層の走向方向）への偏りと、その直交（北西-南東）方向への波動エネルギーが小さい」ことに触れた後、「建物の倒壊被害などを考えるにあたっては単に震源の位置だけでなく、どちらの方向への範囲まで破壊が進行したかが重要なファクターになってくる」と述べている。

菊地（1996）の図は基本的に、Fig. 8c (Hirasawa and Stauder, 1965) の下の図（S波）に似ている。Fig. 8c は、移動震源（Kasahara, 1982）あるいは有限震源（理論地震動研究会, 1997）と呼ばれる、震源（断層）から発するS波の放射パターンである。断層は垂直で、S波速度（ $v_s$ ）の90%の破壊速度（ $v_r=0.9 v_s$ ）で左から右に破壊している状況を示す。また、Fig. 8b は  $v_r=0.5 v_s$  の場合である。これらの図は、Kasahara (1982) がS波として引用し、それを引用した Lay and Wallace (1995) はSH波の放射パターンとしている。野島断層の場合、破壊速度2~3 km/s (菊地, 1998)、S波速度3.2 km/s (Ide et al., 1996; Yoshida et al., 1996) とされる。よって、 $v_r/v_s$  は0.63~0.94であり、Fig. 8c は野島断層の破壊速度の上限に近いパターンと言える。Fig. 8b は野島断層の破壊速度の下限をやや下回る場合となる。なお、Fig. 8a は静止震源（点震源）の放射パターンである（Kasahara, 1982; 理論地震動研究会, 1997）。Figs. 8a・b・cには同じ条件でのP波の放射パターンも示した。

**ダブル・カップルモデル**：Fig. 8の放射パターンおよび前項の震源過程の解析は、ダブル・カップルモデル（DCMと略記）に基づいている。これは断層面のずれが震源となって発する地震波は、静止震源に働くダブル・カップルフォース（断層面で直交する2組の偶力）によって生じる地震波と等価であるというものである（松浦, 1996; 大中・松浦, 2002; 源栄, 2005; Aki and Richards, 2002など）。

地震波の伝播を表す波動方程式の解（任意の時間の観測点の変位）は、近地項、中間地項、遠地項からなる。それぞれ震源からの距離  $r$  の  $1/r^4$ ,  $1/r^2$ ,  $1/r$  に比例する（距離減衰）ので、一般に遠地項以外は無視される。遠地項によって生ずるS波およびP波の変位は、時間に依存しない無次元かつ方位依存性の係数に比例する。これは、「ラディエーションパターン係数」（理論地震動研究会, 1997）、あるいは「放射特性係数」（源栄, 2005）と呼ばれる。

放射特性係数の相対的な大きさは、Fig. 8の原点から1葉の外周を結ぶ長さ、つまり動径で表される。Fig. 8は本来、変位（振幅）に関する放射特性で、時間に依存しない無次元量である。したがって、変位の時間に関する2次微分である加速度（振幅）も、変位（振幅）の2乗の関数であるエネルギー（坂田, 1979）も同じ放射特性を持つことになる。次項から、地震関連アイテムの被害特性について、放射パターンつまりDCMに基づいた解釈を試みる。これを「放射特性に基づく仮説」と称する。

## 5.2 地震波エネルギーと震央距離および断層距離の被害特性

### (1) 震央距離

「放射特性に基づく仮説」に基づいて、震央距離（震央Eと堤軸中心Cを結ぶ距離：Fig. 2）の被害状況（震央から9 km離れてカテゴリスコアCSが最大：Fig. 4b）を検討する。放射特性を示すFig. 8の各図は、それぞれの条件設定は異なる。しかし、いずれの放射パターンも原点を中心とする4つ葉で、各1葉は、紡錘型様あるいは卵型様である。野島断層の場合、震源が海域にあるので、淡路島のため池被害については、この内の $x_1$ 軸方向のS波の一葉のみ考えればよい。Figs. 8b・cの場合は右へ進む一葉である。放射特性係数は、Figs. 8b・cとも $x_1$ 軸上で最大になる。

本論での理論上の $x_1$ 軸はAsを原点とし、野島断層に平行な（一致も含む。以下同じ）直線ということになる。その方位角は、野島断層（Nojima, Fig. 1）の両端を結んだ直線の方位角であり約40



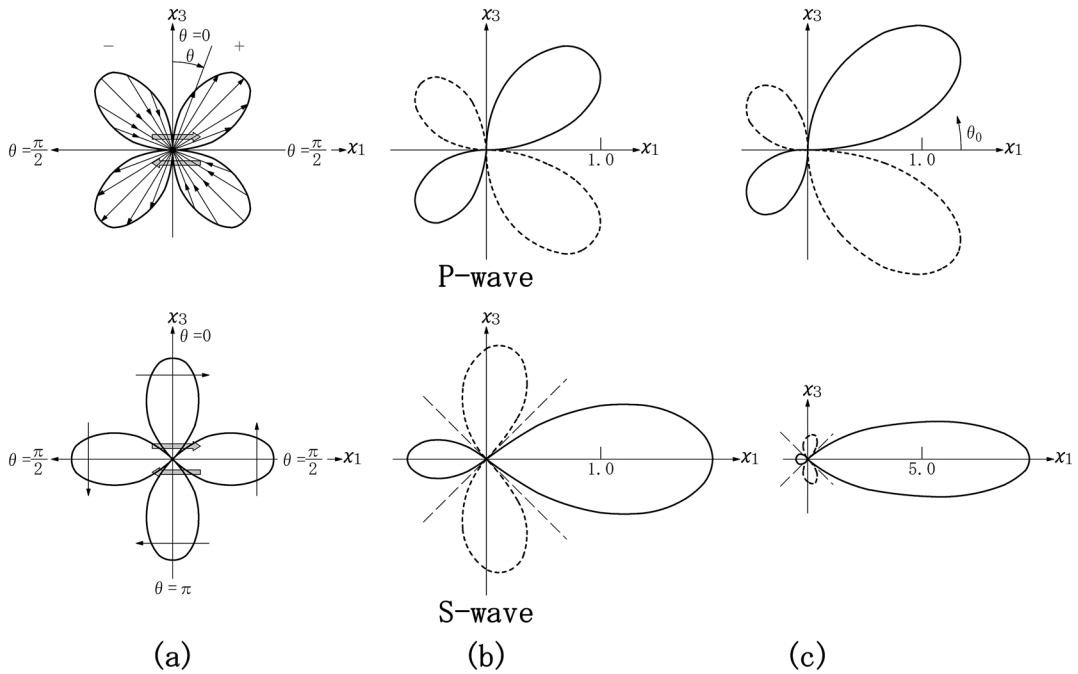


Fig. 8 Radiation patterns (by Courtesy of Kajima Syuppan-kai)  
 8a. For a point source at rest (Riron-jishindo-Kenkyu-kai, 1994)  
 8b. For a line source where  $V_r/V_s=0.5$  (Kasahara, 1983)  
 8c. For a line source where  $V_r/V_s=0.9$  (Kasahara, 1983)  
 NB. 1)  $V_r$ : rupture velocity, 2)  $V_s$ : S wave velocity.

度 (N 40°E) となる。野島断層は鉛直ではなく、その傾斜角は82度 (Sekiguchi et al., 1996) 南東下がりとされるが、基本的な放射特性は Figs. 8b・c と同じとしてよいであろう。

Fig. 8の、放射パターンは、原点から離れる程、ある程度までは進行方向 ( $x_1$  軸) に直交する幅 (「影響幅」と呼ぶことにする) を広げるという特性を持つ。影響幅に比例してその範囲内にあるため池数が増える。エネルギーがある程度以上あれば、結果的に被害数も増加することになる。一方で距離減衰によりエネルギーは減少する。したがって、ある距離を超えると影響幅が増えても、被害数は減少し始める。この逆転位置が最大被害を示すと考えることができる。それが、野島領域および5町領域では、震央距離のCS曲線 (「各カテゴリーに対するカテゴリースコアCSを結んだ線」と定義) の最大値を示す9km (実距離: 9~12km, 平均10.5km) であるとすれば、Fig. 4bの震央距

離の被害状況は理解できる。

## (2) 断層距離

断層距離 (野島領域のみ: 堤軸中心Cから野島断層の最近点Nへの距離) のCS曲線は、野島断層から山側500mの位置に最大値が生じていた (Fig. 4a)。一見、震央距離のCS曲線に似ており妥当に見える。しかし、Fig. 8に示されるように、放射パターンは  $x_1$  軸方向だけではなく、 $x_1$  軸を挟んで両側にもS波およびP波の放射パターンがある。これらが被害に関わるとすれば、断層距離のCS (カテゴリースコア) のピークもまた、断層を挟んで両側にできなければならない。

断層距離のカテゴリーの細分化: Fig. 4aは断層距離500mごとのCSであった。そこで、断層近傍への影響を知るため、断層距離のカテゴリー間隔を短くし、改めて多変量解析を行なった (Case 2, Table 1)。0m未満のカテゴリーは、サ

ンプル(ため池)数を確保するため、-150 m以上、-150 m未滿の2カテゴリーとした。その解析精度は、Table 1(3項)のCase 2に示すように、Case 1とほぼ同じである。

Fig. 9に、Case 2のカテゴリースコア(CS)と被害率(DR)を●印で示す。縦軸の距離の目盛りは、Fig. 4aと異なり、カテゴリーの距離に比例して示している。Fig. 9のCS曲線は、極小値を挟んで-150m(実距離：-150~0 m, 平均-75 m  $\approx$  -100m, CS = -1.07)と、500 m(実距離：500~750 m, 平均625 m  $\approx$  600 m, CS = -1.31)とに、2つのピーク(極大値)を持つ。放射特性に基づく仮説と一致することになる。なお、「放射特性に基づく仮説」とは、以後、「兵庫県南部地震による淡路島北部のため池被害は、放射特性によって強調された地震波(地動加速度)によって生じた」という考え方を言うこととする。

**断層距離の被害状況の検証：**Fig. 9の断層距離の特異なCSの分布は果たして正しいのかという疑問が起きる。すなわち、CSは(1)式に示される判別方程式の $A_{jk}$ である(2.3節)。Case 2の場合、カテゴリー数は82個あるから82項の多項式の係

数となる。この係数 $A_{jk}$ は、この多項式の相関比を最大にするように定められる(2.3・2.4節)。特異なサンプルが混じっていると、各 $A_{jk}$ すなわちCSはその影響を受ける可能性がある。つまりCSの計算結果の安定性に問題が生ずる。しかし、数量化理論II類ではこれを検討する手法は示されていない。

一般的な統計量の精度を検討する一手法として、ジャックナイフ法(Yang and Robinson, 1986; 岩崎・他, 2004; 青木, 2005; 松原, 2007; 小西・他, 2008)がある。これは、元のN個のサンプルを持つデータxから、i番目の $x_i$ を除いた(N-1)個のデータで、(N-1)回算定を繰り返し、それらの平均値と標準誤差(標準偏差/ $\sqrt{N}$ )を算定し、その精度を評価する手法である。あるいは、1グループm個ずつのN個のグループに分け、同様に算定する。

Fig. 9の傾向が正しいとすれば、サンプル数が減少しても同じ傾向を示さなければならない。そこで、ジャックナイフ法に準じて次のような手法でこれを検定した。まず、野島領域の395個のサンプル(ため池)から1割(39.5  $\approx$  40個)減じたデー

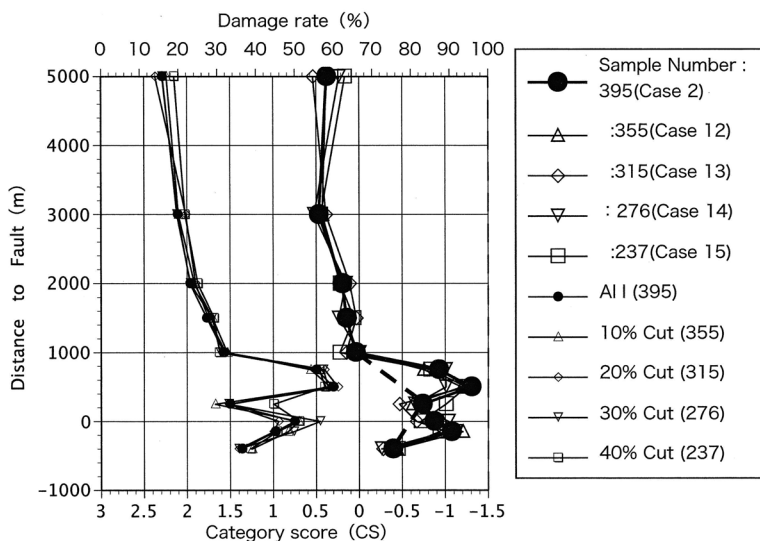


Fig. 9 Category scores (CS) and damage rates (DR) of the distance to the Nojima fault for Case 2 and the other four cases using a quasi-jack-knife method  
NB. cf. Table 4, and see the main text for details.

タ (10%Cut: 1割削除と称する) を用い多変量解析を行った。ただし、データファイルのため池は、おおむね北から南に順に並べられているので、機械的に分けるとデータに偏りが生ずる。そこで、1~395までの重複しない乱数を発生させ、これを各ため池に与え仮番号とした。

この仮番号を付けたため池を、1番から昇順に並べ替え、前半部から40個 (仮番号121~160番) を削除した355個をデータとして計算した。これを10回繰返した。そのつど、新たな乱数を使用しているので、当然削除されるサンプルの組合せは異なる。同様な手順で、2割・3割・4割削除のケースについて、それぞれ10回ずつ多変量解析を行なった。なお、5割削除のケースは計算不能であった。サンプル数 (197個) が、アイテム数 (10個)、カテゴリー数 (82個) に比べ少な過ぎたためと考えられる。

これらの4ケースを Case12 (1割削除) ~ Case 15 (4割削除) とする。Table 4に、Table 1にならぬ、各ケースの、サンプル数 (項目1: 総数 T, 無被害数 U, 被害数 D), 被害率 (同2: DR), 解析精度 (同3: 相関比 CR, 重相関係数 CC, 判別の中率  $H_R$ , 確率的判別の中率  $H_{RP}$ , 第1相対精度  $R_{A1}$ , 第2相対精度  $R_{A2}$ ) を示した。た

だし、同表の各数値は、上記各項について、各ケース10回分の計算結果の、平均値 (AV), 変動係数 (CV=標準偏差 / AV × 100) である。各ケースの相対精度は  $R_{A1} (> 1)$ ,  $R_{A2} (> 0)$  とも基準を満足している。

Fig. 9に、各ケースのカテゴリースコア (CS), 被害率 (DR) を示す。Case 2を除き、各ケースとも、10回の計算結果の平均値をプロットしている。凡例の括弧内の数値は、各ケースのサンプル数である。CS 曲線は、4割削除 (Case 15: サンプル数 237個) になるとやや乱れがでる。しかし、1割削除 (Case 12: 355個) から3割削除 (Case 15: 276個) の3ケースのCS 曲線は、全数 (Case 2: 395個) のそれと殆ど一致している。結果は安定しており、断層距離のピークが2つ (-150 m と 500 m) できる現象は統計的に正しいとしてよい。

断層距離のCS 曲線の検討: Figs. 8b・c によれば、S波の  $x_1$  軸方向の放射特性係数は、 $x_1$  軸に直交方向のS波あるいはP波のそれより遥かに大きい。したがって、後者による被害は、前者による被害に包含されるのではないかという疑義が生じる。

$x_1$  軸上で放射特性により強調されたS波のみによる被害を受けるとすれば、CSは  $x_1$  軸上で最大

Table 4 Data and accuracy of the analyses based on the quasi-jack-knife method

| Case                    | 1             | 12                                       |     | 13    |      | 14    |     | 15    |      |
|-------------------------|---------------|--|-----|-------|------|-------|-----|-------|------|
| Abbr.                   | Original Data | Deleteing Samples from the Original Data |     |       |      |       |     |       |      |
|                         |               | 10%                                      |     | 20%   |      | 30%   |     | 40%   |      |
|                         |               | AV                                       | CV  | AV    | CV   | AV    | CV  | AV    | CV   |
| 1. Number of Dams       |               |  |     |       |      |       |     |       |      |
| T                       | 395           | 355                                      | 0.0 | 315   | 0.0  | 276   | 0.0 | 237   | 0.0  |
| U                       | 283           | 255                                      | 1.2 | 225   | 1.7  | 198   | 1.4 | 169   | 2.3  |
| D                       | 112           | 100                                      | 2.9 | 90    | 4.2  | 79    | 3.5 | 68    | 5.6  |
| 2. Damage Rate (%)      |               |  |     |       |      |       |     |       |      |
| DR                      | 28.4          | 28.2                                     | 2.9 | 28.7  | 4.2  | 28.4  | 3.5 | 28.7  | 5.6  |
| 3. Accuracy of Analysis |               |  |     |       |      |       |     |       |      |
| CR                      | 0.306         | 0.321                                    | 4.8 | 0.335 | 7.6  | 0.388 | 6.1 | 0.395 | 8.9  |
| CC                      | 0.554         | 0.784                                    | 2.5 | 0.793 | 1.5  | 0.814 | 2.9 | 0.814 | 2.7  |
| $H_R$                   | 76.5          | 77.2                                     | 2.4 | 78.0  | 1.9  | 80.4  | 2.3 | 80.4  | 3.0  |
| $H_{RP}$                | 59.4          | 59.5                                     | 1.2 | 59.3  | 1.8  | 59.3  | 1.5 | 59.1  | 2.4  |
| $R_{A1}$                | 1.289         | 1.296                                    | 2.2 | 1.314 | 3.1  | 1.355 | 1.8 | 1.360 | 3.6  |
| $R_{A2}$                | 42.2          | 43.5                                     | 9.9 | 45.3  | 10.3 | 51.9  | 7.5 | 52.0  | 11.7 |

NB. 1) AV: average values for 10 calculations, 2) CV: coefficient of variation ( $=\sigma/AV \times 100$ ),  $\sigma$ : standard deviation, 3) See the caption of Table 1 for the other items.

(ピークは1つ)となり、両側へ漸減する筈である。ところが、ピーク(極大値)は2つあり、その間の250m(実距離250~500 m:平均375 m  $\approx$  400 m, 以下同じ)に極小値がある。しかし、この極小値のCS(-0.74)は、2つの極大値の山の麓にあたる「-150 m 未満」(-369~-156 m: -262.5 m  $\approx$  -260 m)のCS(-0.39)、および1000 m(1000~1500 m:1250 m)のCS(0.04)の値より遥かに大きい(負数の絶対値で論じている。3.2.(1)項)。

このことは次のように想定できる。まず、a)  $x_1$ 軸を中心として放射特性により強調されたS波を受けて、250 mをピークとする大きなCS(被害)の山ができた(Fig. 9の破線)。一方で、b)  $x_1$ 軸の両側に発する直交方向へのS波、あるいは斜交方向へのP波を受けて、 $x_1$ 軸の両側に2つのCSのピークができた。c) a)の上にb)が重畳し、その結果250mが極小値となった。このように考えれば、この現象は理解できる。これらの論議から、断層距離250 m(実距離平均375 m  $\approx$  400 m)、つまり、地表野島断層から約400 m山(東)側に離れた付近に地震波を射出した発震源があることになる。

### 5.3 地震加速度と堤体の法線角度

#### (1) 堤体の法線角度と被害との関係

震央距離、断層距離の被害特性は、「放射特性に基づく仮説」により説明できた。法線角度つまり震央角度、断層角度の被害状況も同じように説明できるだろうか。

**被害に関わる地震波：**Fig. 10に、被害に関与すると考えられる、放射特性によって強調された地震波を理想化し、模式図として示す。As( $\approx$ 震央)、およびこれから延びる $x_1$ 軸から発する地震波である。 $x_1$ 軸は、野島断層を直線(N40°E)として近似し、これに平行な直線とした(5.2.(1)項)。

Fig. 8b・cの放射パターンに基づけば、強調された地震波がAsから、 $x_1$ 軸方向へのS波( $S_{1e}$ )、 $x_1$ 軸に直交方向へのS波( $S_{3e}$ )、および斜交方向へのP波( $P_e$ )として発せられる。また、Asからの地震波ほど強くはないものの、野島断層( $\approx x_1$ 軸)からも地震波( $S_{1f}$ ,  $S_{3f}$ ,  $P_f$ )射出されているこ

とになる(5.1.(1)項)。なお、添字は、「1」が $x_1$ 軸方向、「3」が $x_1$ 軸に直交方向へ射出される地震波を表し、「e」がAs( $\approx$ 震央: epicenter)、「f」が断層(fault)から発する地震波を表している。

つまり理論的には、「強調された断層走向( $x_1$ 軸)方向のS波」(S1波と呼ぶ)の $S_1$ ( $S_{1e}$ ,  $S_{1f}$ )、「強調された断層走向( $x_1$ 軸)直交方向のS波」(S3波と呼ぶ)の $S_3$ ( $S_{3e}$ ,  $S_{3f}$ )、「強調された斜交方向のP波」のP( $P_e$ ,  $P_f$ )が発震されることになる。なお、P波に関しては必要に応じ、添字を付けて海側(断層の西側:「S」)と山側(断層の東側:「M」)とを区別する。

**被害を受け易い堤体の配置：**これらの地震波が被害に関与することになるが、実際に堤体に被害を与えるのは地動加速度である。ため池(厳密にはため池堤体)は、小規模なものが多いがフィルダム(fill-dam:盛土したダム、英語圏ではembankment dam)である。堤体は3次元構造物であるが、一般に堤軸が長いから、2次元的な平面ひずみ問題として捉える。特殊な場合を除き、設計や解析は標準断面について行なう(発電水力協会, 1972:農林水産省構造改善局, 1981; USBR, 1960)。堤体に作用する力は、全てこの標準断面に作用させる。地動加速度も例外ではない。このことは、堤軸に直交する断面が構造的に最も弱いことを前提としており、この断面に作用する地動加速度成分によって被害が生じやすいと言える。

スカラー量であるエネルギーと異なり、ベクトル量である加速度はその向きが重要になる。S波の放射特性係数は $x_1$ 軸上で最大になる(Figs. 8b・c)。S波は剪断波だから、射出方向の直交方向に、その動径で表される放射特性係数に比例した加速度が働く。As領域が震央の近傍にあるとすれば、震央角度直交(90°)のため池が最も被害を受けることになる。また、P波は粗密波だから、射出方向(震央角度斜交、 $\pm 45^\circ$ )に、同じく動径に比例した加速度が働く。Fig. 10には、これらの放射特性により強調された地震波による、加速度の被害を最も受けやすいため池堤体の配置を、理想化して示している。これらの堤体を「モデル

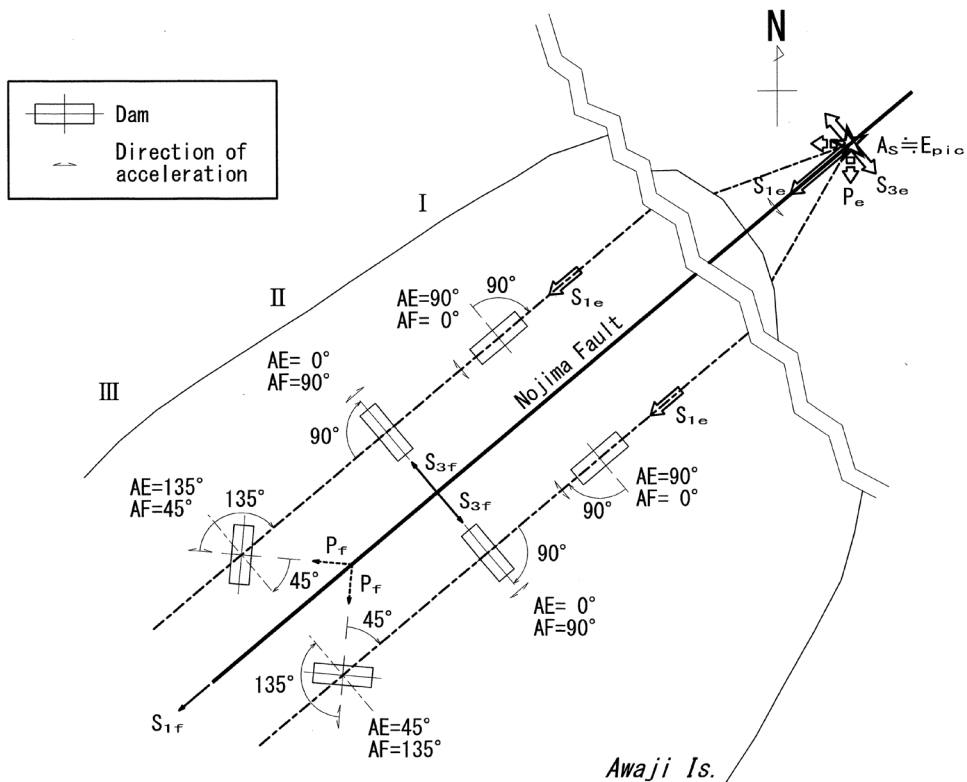


Fig. 10 Schematic diagram of the modeled dams that are located in the most vulnerable positions in respect to the seismic waves shown with the arrows for the one-fault model. The theoretical values of the angles to the epicenter (AE) and to the Nojima fault (AF) are also shown NB. See the main text for details.

堤体」と呼ぶことにする。 $x_1$ 軸上に全てを表せないので、 $x_1$ 軸を挟んで、平行な2本の補助直線上にこれらを示している。

堤軸が、 $x_1$ 軸に重なる(一致する)堤体配置Iは $x_1$ 軸方向のS1波( $S_1$ )の、直交方向の堤体配置IIは $x_1$ 軸直交方向のS3波( $S_3$ )の、斜交する堤体配置IIIはP波( $P_s, P_M$ )の、加速度の被害を最も受け易いことになる。なお、前節では震央距離、断層距離の被害を放射特性係数に基づくエネルギーで論じた。放射特性係数は時間に依存しない無次元量だから、そのまま加速度に読み替えることができる。

**震央角度および断層角度の理論値**：震央角度の計測値(多変量解析データ)は、基準線「(堤体T)の堤軸中心Cと震央Eとを結ぶ直線CE」と、

「堤軸法線」との交角とした(2.2.(2)項, Fig. 2)。理論値も同様の考え方に従う。Fig. 10において、堤体配置Iのモデル堤体(以下「モデル堤体I」と記す)のCEは $x_1$ 軸であり、理論値の基準線となる。このモデル堤体の堤軸法線は $x_1$ 軸に直交する。その交角は $90^\circ$ (AE, Fig. 10, 以下同じ)である。これがS1波( $S_1$ )の被害を最も受け易い「モデル堤体の震央角度」であり、「震央角度の理論値」となる。同様に、S3波( $S_3$ )の被害を最も受け易いモデル堤体IIの震央角度の理論値は $0^\circ$ ( $S_3$ )となる。モデル堤体III(P波)に対しては、山側が $45^\circ$ ( $P_M$ )、海側が $135^\circ$ ( $P_s$ )となる(Fig. 10)。これらはいずれも $180^\circ$ 表示としている。

法線角度(震央角度、断層角度等)の理論値は、このように「 $^\circ$ 」を付けて表す。法線角度の「計測

値]、あるいは、「CS ピーク角度」(3.2. (3) 項)等の「度」表示と区別する。なお、「CS ピーク角度」は、計測値・理論値に対し「CS ピーク値」とも称する(厳密には「CS ピーク値を示す角度」であるが、この両者を使い分けている)。断層角度の計測値は、基準線「堤軸中心Cからの野島断層上の最近点Nの法線」と「Cの法線」との交角とした(Fig. 2, 3.2. (2) 項)。モデル堤体での、断層角度の理論値の基準線は $x_1$ 軸の法線となる。したがって、S3波( $S_3$ )による被害を最も受け易いモデル堤体II(堤軸法線が $x_1$ 軸と一致)の「断層角度の理論値」(AF)は $90^\circ$ となる(Fig. 10)。断層角度の理論値(AF)は他に、モデル堤体I( $S_1$ )の $0^\circ$ 、モデル堤体III(P波)の $135^\circ$ ( $P_M$ )および $45^\circ$ ( $P_S$ )がある(Fig. 10, 5.3. (1) 項)。

**理論値の直交ペア**：Fig. 10において、( $S_1$ の被害を受け易い)モデル堤体I(震央角度 $90^\circ$ )と、( $S_3$ の被害を受け易い)モデル堤体II(同 $0^\circ$ )との、法線同士、あるいは堤軸同士とは直交している。つまり、この両角度は「直交関係」にある(3.2. (3) 項)。そして、この震央角度の直交関係の組み合わせ「 $90^\circ$ ( $S_1$ )と $0^\circ$ ( $S_3$ )」を震央角度の理論値の「直交ペア」と呼ぶことにする。また、(P波の被害を受け易い)モデル堤体IIIの「海側( $135^\circ$ ： $P_S$ )と山側( $45^\circ$ ： $P_M$ )」の理論値についても同様である。断層角度については、「 $0^\circ$ ( $S_1$ )と $90^\circ$ ( $S_3$ )」、「 $45^\circ$ ( $P_S$ )と $135^\circ$ ( $P_M$ )」の理論値の直交ペアが成立する。

理論値の直交ペアは震央角度、断層角度それぞれに、S波1組(2角度)、P波1組(2角度)の2組(4角度)ずつあることになる。これらの理論値の直交ペアは、放射特性(S波・P波共に直交2方向)からきまる。理論値の直交ペアの考え方は、次項から述べるCSピーク値(CSピーク角度)を解釈する際の手がかりとなる。

## (2) 法線角度のCSピーク値と理論値との比較

**CSピーク値の直交ペア**：野島領域における震央角度(Fig. 4d)のCSピーク値には、直交関係の10度と100度があった(3.2. (3) 項)。この他にもCSピーク値として、 $30 \cdot 70 \cdot 130 \cdot 150$ 度の4角度がある。斜字の「130度」は、準ピーク

(ピークはあるが無被害側でCSがプラスの角度、3.2. (3) 項)である。ただし、その被害率は35.5%で平均被害率28.4%より高い、3.2. (3) 項)の角度である(以下同じ表記とする)。これらの4角度は、ほぼ直交( $90 \pm 10$ 度)の、30度と130度、70度と150度の組合せができる。

この組み合わせを、上述の「(理論値の)直交ペア」に対し、「(CSピーク値の)直交ペア」と称する。つまり、野島領域の震央角度のCSピーク値は、(i)10度と100度(90度差)、(ii)30度と130度(100度差)、(iii)70度と150度(80度差)、の3組のCSピーク値の直交ペア(1組)あるいはほぼ直交ペア(2組)が成立する。

5町領域の震央角度のCSピーク値(Fig. 4d)は、 $10 \cdot 40 \cdot 70 \cdot 100 \cdot 140 \cdot 160$ 度の6角度にあった。これも同様に、(iv)10度と100度(90度差)、(v)40度と140度(100度差)、(vi)70度と160度(90度差)、と3組の直交ペア(2組)あるいはほぼ直交ペア(1組)ができる。

また、野島領域の断層角度のCSピーク値は、 $10 \cdot 20 \cdot 40 \cdot 80 \cdot 100 \cdot 120 \cdot 140 \cdot 160$ 度の8角度があった(Fig. 4c)。この内、120度はCSが無被害側のピークであり、準ピークとした(3.2.(3)項)。また、10度③'はピークではないが、20度③のピークに連なり、それに準ずるCSを示す角度である(丸数字はCS順位、5.3. (4) 項)。このような角度も「準ピーク」と呼び、斜字で示す。2種類の準ピーク(3.2. (3) 項)が定義されたことになる。このような準ピークは震央角度にもある(野島領域10度①： $0$ 度①'、150度②： $160$ 度②'、5町領域10度④： $0$ 度④')。

断層角度のCSピーク値は、準ピーク(10度と120度の2角度)を使わない場合、(i)'20度と100度(80度差)、(ii)'40度と140度(100度差)、(iii)'80度と160度(80度差)、の3組のほぼ直交ペアができる。準ピークを使う場合は同様に、(ia)'10度と100度(90度差)、(ib)'20度と120度(100度差)、(ii)'40度と140度(100度差)、(iii)'80度と160度(80度差)、と4組の、直交ペア(1組)あるいはほぼ直交ペア(3組)ができる。なお、断層角度は野島領域のみについて論ずるので、以下、原則

として単に「断層角度」と記す。

**許容差の設定**：これら CS ピーク値のペアの内、A) 「40度と140度」(100度差：上述のペアの (v), (ii)') のほぼ直交ペアは、理論値の直交ペア、「45° ( $P_M$  起因) と 135° ( $P_S$  起因)」に対応していると見なせる。また、B) 「10度と100度」(90度差：同じく (i), (iv), (ia)') の直交ペアは、理論値の直交ペア、「0° ( $S_3$  起因) と 90° ( $S_1$  起因)」に対応しているとしてよい。

A) の、CS ピーク値の「ほぼ直交ペア」は、10度の差を許せば、「直交ペア」と見なせ、理論値の直交ペアとも整合することを示す。そこで、CS ピーク値の直交における10度の差 ( $90 \pm 10$ 度) を許容し、これを「許容差」と定義する。以後特に断らないかぎり、「直交ペア」という場合、「ほぼ直交ペア」を含むものとする。

B) の、CS ピーク値の直交ペア (10度と100度) は、理論値の直交ペア (0° と 90°) を、10度だけずらした形になっている。ここでも、理論値と CS ピーク値の間に、許容差10度を設ければ、個々の CS ピーク値と理論値は一致することになる。よって、理論値と CS ピーク値との間にも、10度の差を許容し、許容差とする。「許容差」10度を、CS ピーク値の直交ペアと共に、理論値と CS ピーク値との間にも設定したことになる。

**理論値と CS ピーク値の直交ペアとの比較および (堤軸法線) 方位角**：許容差10度を設けたことにより、5町・野島領域では、震央角度および断層角度の CS ピーク値の直交ペアがそれぞれ3ないし4組できたことになる。一方、理論値の直交ペアは、震央角度が「0° ( $S_3$ ) と 90° ( $S_1$ )」 と「45° ( $P_M$ ) と 135° ( $P_S$ )」、断層角度が「0° ( $S_1$ ) と 90° ( $S_3$ )」 と「45° ( $P_S$ ) と 135° ( $P_M$ )」の2組ずつである。理論値と CS ピーク値との直交ペア数は合致しない。

ここで、堤軸法線の方位角の CS ピーク値 (Fig. 6) を見る (3.3節)。野島領域、5町領域とも、CS ピーク値は30度と50度にある。方位角50度は、震源過程解析に用いられている野島断層の走向の  $N52^\circ E$  (Ide et al., 1996; 山田・他, 1999)、および  $N45^\circ E$  (Sekiguchi et al., 1996, 1998; Horikawa et

al., 1996; Yoshida et al., 1996; Wald, 1996; Kikuchi, 1998; Kotetsu, 1998) に近い。

$As$  (領域) が野島断層の北東端付近にあるとすれば (5.1. (1) 項)、今までの論議から、堤軸法線の方位角のピークは50度だけの筈だが、30度にもピークがある。そして、これらの角度の直交方向である  $110 (= 30 + 90 - 10)$  度、 $130 (= 50 + 90 - 10)$  度にもピークがある (Fig. 6)。つまり、許容差を考慮すると、DCM の放射パターンに従う20度ずれた2つの直交系があり、「2つの大きなすべり領域がある」ことを示唆する。

### (3) 1直線モデルと3直線モデル

野島断層の形状は緩やかなS字型をしている (Fig. 1)。これは3本 ( $N1$ ,  $N2$ ,  $N3$ ) の直線 (セグメント) で近似でき、模式図化すれば Fig. 11 のようになる。すなわち、 $N1$ ：野島断層北端から江崎 (Ezaki) 付近を通る直線、 $N2$ ：平林 (Hirabayashi) 付近から轟木 (Todoroki) 付近を通る直線、 $N3$ ：葦浦 (Hikiura) 付近から富島 (Toshima) 付近を通る直線である。 $N1$  と  $N3$  とは平行で、その間隔は約1.3 km (国土地理院, 1996)、それらの方位角は50度である。また、 $N2$  の方位角は約30度である。 $N1$  と  $N2$  の交角、および  $N2$  と  $N3$  の交角は約20度となる。これらの方位角は、Fig. 6 の CS のピークを示す堤軸法線方位角 (50度, 30度) と一致する。このモデルを「3直線モデル」と呼ぶことにする。これに対し、前項までのモデル (野島断層を1本の直線で近似, Fig. 10) を「1直線モデル」と呼ぶ。

**$As'$  および  $As$  系,  $As'$  系の設定**：1直線モデルでは、野島断層に平行な直線を  $x_1$  軸 ( $N40^\circ E$ ) とした (5.2. (1) 項)。そして、ため池堤体の被害は、 $As$  ( $\equiv$  震央) から射出される、放射特性により強調された地震波により生じたとした。3直線モデルでは、 $N1 \cdot N2 \cdot N3$  の断層セグメントに平行な直線を、 $N1x$  ( $N50^\circ E$ )  $\cdot N2x$  ( $N30^\circ E$ )  $\cdot N3x$  ( $N50^\circ E$ ) 軸とする。原点は、1直線モデル同様に (現) 震央 ( $\equiv As$ ) とした。

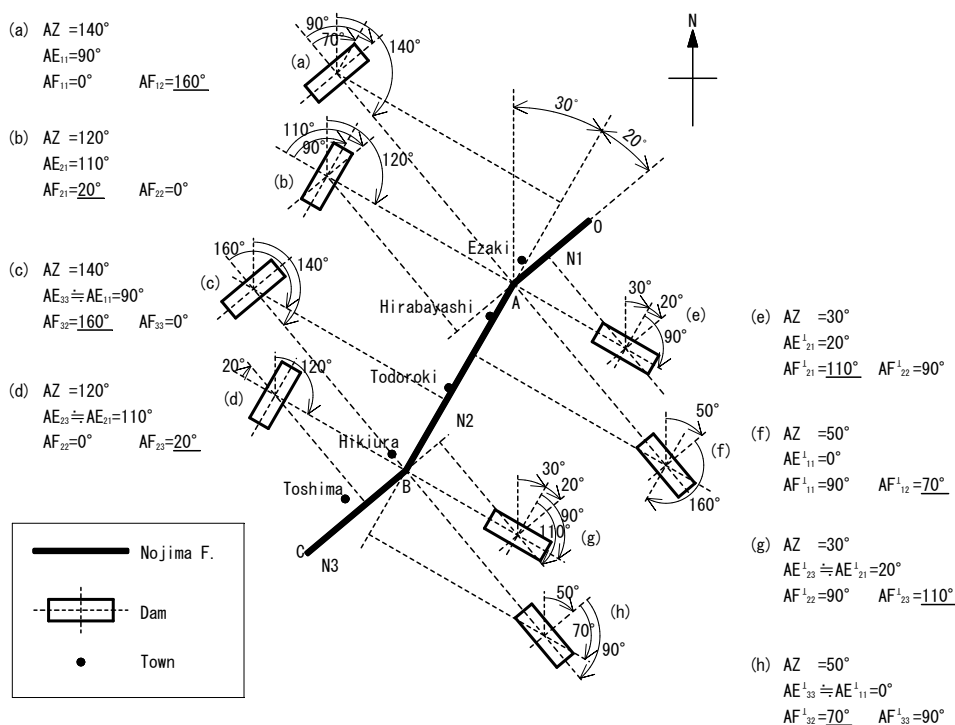
3直線モデルでは、強調された  $S1$  波は  $As$  から  $N1x$  軸に沿って放射される。また、今までの論議

から、N2x軸上にも大すべり領域があることになる。このすべり領域の中心を「As'」とし、この領域を「As'領域」とする。N2セグメントは、震央距離（現震央からの距離）のカテゴリー、6・9km(実距離：6～12km。以下「カテゴリー」省略)の区間にあたる。

**Table 3** (震源過程解析例)における各モデルのA<sub>1</sub>の「モデル震央からの距離」(g)を、「現震央から距離」(g-f:fは0か1km)に読み替える(5.1.(1)項)。なお、**Table 3**では、「震央より南への距離」をマイナスとしている。多変量解析のそれらとは正負が逆になる(5.1.(1)項)。両者の表記はそのままにして、正負を読み替える。N2セグメント(6～12km)に該当するA<sub>1</sub>は、1kmの過不足を許容する(-5～-13km)と、6モデル(M①・②・③・⑤・⑨・⑩)：-8・-9・

-5・-6・-13・-13km)ある。これらのA<sub>1</sub>をAs'系と呼ぶことにする。これに対して、残りの4モデル(M④・⑥・⑦・⑧)：0・0・2・2km)のA<sub>1</sub>はAs(≡震央)付近にあり、As系となる。A<sub>2</sub>、A<sub>3</sub>も同様の考え方とする。

**Table 3**の10モデルのA<sub>1</sub>は、As系(4モデル)かAs'系(6モデル)かのどちらかに分別される。A<sub>2</sub>についても、As系が1例(M⑨)：-1km)、As'系が3例(M④・⑦・⑧)：-6・-11・-11km)、A<sub>3</sub>については、As系が1例(M⑩)：-1km)ある。そして、A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>のいずれかが震央付近(As系：0～2km)にあり、他方がN2セグメント(As'系：-5～-13km)にあるモデルは4例(M④・⑦・⑧・⑨)ある。これらの論議から、Asが震央付近に、As'がN2区間にあるとした、本論の設定は許されよう。



**Fig. 11** Schematic diagram of the modeled dams that are located in the most vulnerable positions in respect to the SH waves in the three-fault model. The theoretical values of the azimuth of the modeled dam (AZ), the angles to the epicenter (AE) and to the Nojima fault (AF) are also shown.

NB. See also **Table 5** for the relations between the theoretical angles of AZ, AE, AF and the corresponding seismic waves.



なお、震度分布図(古川・伊藤, 1995; 気象庁, 1997)によれば, N2セグメント付近に震度7地帯(震央距離で9・12・15 km, 実距離: 9~18 km)がある。N2セグメントは9 km 区間で震度7地帯と重なっていることになる。As' が9km 区間(9~12 km)にある可能性を示唆する。1kmの過不足を許容(-8~-13 km)すれば, この区間にはA<sub>1</sub>が4例(M①・②・⑨・⑩: -8・-9・-13・-13 km), A<sub>2</sub>は3例(M④・⑦・⑧: -6・-11・-11 km)あることになる。

**As系およびAs'系のAnの震央距離と深さ:**  
Table 3の各モデルは, A<sub>1</sub>の距離(Dist.: g)からAs系, As'系に分別された。これらのA<sub>1</sub>の深さ(Depth: h)に注目する。As系(④・⑥・⑦・⑧: 12・8・13・14 km)は, 8~14 km (M⑥以外は12~14 km)である。これに対し, As'系(M①・②・③・⑤・⑨・⑩: 0・0・0・4・0・3 km)は, 0~4 km (M⑤以外は0~3 kmで4例が0 km)と浅い。

すなわち, 震源過程解析結果10例(Table 3)の最大すべりの中心点A<sub>1</sub>は, 改めて, 「震央距離と深さ」から, 震央に近く(0~2 km)かつ深い(10 km 前後)位置にあるAs系と, 震央から離れ(-5~-13 km)かつ浅い(0~4 km)位置にあるAs'系との2種類に分別できる。数は少ないが同様に, A<sub>2</sub>(i)に2例(As系:M⑨, As'系:M④), A<sub>3</sub>(k)にも1例(As系:M⑩)がある。

以後, この2つの(As・As')領域が存在するとして論議を進める。ため池堤体の被害は, Asと共にAs'から射出された強調された地震波により生じたことになる。それぞれに関与するアイテム等を, As系, As'系と呼ぶ。なお, 多変量解析からは, 深さに関する情報は得られていない。5.1.(1)項では, Asを「最大地震波の発震点」(A<sub>1</sub>)とした。しかし, 上述のように震源過程解析例からは, As・As'いずれも, A<sub>1</sub>(最大地震波の発震点)でありうる。以後, As・As'共に「大地震波の発震点」として扱う。

**3直線モデルにおける被害に関わる地震波:**  
As, N1x軸からの地震波はAs系であり, 1直線モデルをそのまま読み替える。すなわち, S1波

としてS<sub>1</sub>(S<sub>1e</sub>, S<sub>1f</sub>), S3波としてS<sub>3</sub>(S<sub>3e</sub>, S<sub>3f</sub>), P波としてP(P<sub>e</sub>, P<sub>f</sub>)が射出される。As', N2x軸からの地震波はAs'系である。As系と同様に, S<sub>1</sub>(S<sub>1e</sub>, S<sub>1f</sub>), S<sub>3</sub>(S<sub>3e</sub>, S<sub>3f</sub>), P(P<sub>e</sub>, P<sub>f</sub>)が射出されることになる。N3x軸上に関しては, As, As'に相当する大きな発震源は同定できていない。また, 震源過程解析例にも該当するものはない(Table 3)。あるとすれば, As''およびN3x軸から発震される地震波は, S<sub>1</sub>''(S<sub>1e</sub>'', S<sub>1f</sub>''), S<sub>3</sub>''(S<sub>3e</sub>'', S<sub>3f</sub>''), P'(P'<sub>e</sub>, P'<sub>f</sub>)となる。このように, N2x軸, N3x軸に関する地震波には, それぞれ('), (')を付ける。

なお, 震源過程解析例の各図(5.1(1)項)によれば, 大すべり領域(本論でいAs・As'領域)のすべりに比べ, その他の部分のすべりがはるかに小さい計算例が多い。つまり, S<sub>e</sub>>S<sub>f</sub>, S'<sub>e</sub>>S'<sub>f</sub>となる。S<sub>f</sub>・S'<sub>f</sub>の被害への実質的な関与は少ないと考えられる。以後, 特に必要のない限り, 単にS<sub>1</sub>, S'<sub>1</sub>と表し, S<sub>1e</sub>, S'<sub>1e</sub>と同義とする。他の地震波についても同様の考え方で表記をする。

**3直線モデルにおいてS波の被害を受け易い堤体配置:** Fig. 11に, 3直線モデルにおいて, 強調されたS波により, 最も被害を受け易い8個のモデル堤体(模式図(a)~(h))の配置を示した。各堤体は断層セグメントNiに対して描かれている。しかし, 地震波の発震源に関与するNix軸は, Niに平行としている。Nix軸に対するモデル堤体の位置関係は, Niに対する位置関係を同じとなる。ここでは, NiセグメントをNix軸に読み替える。

Fig. 11の, (a)~(d)のモデル堤体は, Nix軸から離して平行に描いている。実際は, 堤軸と, Nix軸またはその延長線とが一致する堤体配置である。軸上に描くと図と文字が錯綜し見難くなるのでこうした。これらの4堤体は, 軸方向のS1波の被害を受け易い。すなわち, (a)はS<sub>1</sub>, (b)・(d)はS'<sub>1</sub>, (c)はS<sub>1</sub>'(あるとすれば)による被害を最も受け易い堤体配置(モデル堤体)である。また, 軸直交のモデル堤体(e)~(h)は, 軸直交方向のS3波による被害を受け易い。すなわち, (e)・(g)はS<sub>3</sub>の, (f)はS<sub>3</sub>'の, (h)はS<sub>3</sub>''(あるとすれば)

の被害を最も受け易い堤体配置である。

#### (4) 3直線モデルの震央角度の理論値とCSピーク値

**震央角度の理論値の表記：**Fig. 11の各モデル堤体には、一般化した表記で震央角度 ( $AE_{ij}^- \cdot AE_{ij}^+$ )、断層角度 ( $AF_{ij}^- \cdot AF_{ij}^+$ )、および堤軸法線の方位角 ( $AZ$ ) の理論値を記した。 $AE_{ij}^- \cdot AE_{ij}^+$  は、 $N_{1x}$  軸に堤軸が一致・直交するモデル堤体の震央角度を、 $N_{jx}$  軸を基準として得た値を意味する。例えば、図中のモデル堤体 (a) は  $N1$  区間 ( $i=1$ ) にあり、堤軸が  $N1x$  軸と一致していることを表す。震央角度の理論値 ( $AE_{ij}^-$ ) は、堤軸法線と  $N1x$  軸 ( $j=1$ ) との交角であるから、 $AE_{11}^- = 90^\circ$  となる。また、モデル堤体 (f) は  $N1$  区間 ( $i=1$ ) にあり、堤軸が  $N1x$  軸と直交している。 $N1x$  軸を基準 ( $j=1$ ) としているので、震央角度の理論値 ( $AE_{11}^+$ ) は  $0^\circ$  となる。

**3直線モデルにおける震央角度の理論値の基準線：**1直線モデルでの理論値の基準線  $x_j$  軸は、震央 ( $\equiv As$ ) を原点とする野島断層に平行な直線で、かつ  $S_1$  波 ( $S_1$ ) の射出方向であるとした。3直線モデルは、 $N1x \cdot N2x \cdot N3x$  軸からなる。これらの内、基準線を、 $As$  からの大地震波  $S_1$  の射出方向と考えられる、「 $N1x$  軸およびその延長線 (方位角  $50^\circ$ )」とする。各軸およびその延長線と、堤軸とが一致しているモデル堤体  $T$  が、それぞれの軸上の発震点からの  $S_1$  波による最も大きな被害を受ける。 $N1x$  軸に関しては、 $As$  からの  $S_1$  起因の被害で、モデル堤体  $T$  の震央角度の理論値  $AE_{11}^-$  は  $90^\circ$  (Fig. 11のモデル堤体 a) である。 $N2x$  軸 (方位角  $30^\circ$ ) に関しては、 $As'$  からの  $S_1$  起因の被害で、堤軸が基準線 ( $N1x$  軸) に対し  $20^\circ$  ずれる。震央角度の理論値  $AE_{21}^-$  は  $110^\circ$  (Fig. 11, 同 b) となる。

$N3x$  軸に関しては、あるとすれば、 $As''$  からの  $S_1$  起因の被害となる。 $S_1$  の被害を最も受けるモデル堤体  $T$  の震央角度の理論値は  $AE_{31}^-$  となる。ただし、 $N3x$  軸は基準線 ( $N1x$  軸およびその延長線、上記) とは平行 (間隔  $1.3$  km) である。堤体  $T$  の  $AE_{31}^-$  は  $N3x$  軸上の位置により変わってくる。3

直線モデル (Fig. 11) の  $N1 \cdot N2 \cdot N3$  を  $OA$  (始点  $O$ 、終点  $A$ )  $\cdot AB \cdot BC$  で表す。ここで  $O$  は震央であり  $As$  と見なせるとしている (5.1. (1) 項)。

$AE_{31}^-$  の基準線  $N1x$  軸に対する最大のずれは、モデル堤体  $T$  が  $B$  点 ( $N2$  の終点で  $N3$  の起点) にあるとき生じる。 $OB$  の基準線上の長さは  $6.9$  km である (国土地理院, 1996)。モデル堤体  $T$  の堤軸は、基準線に対して約  $10$  度 ( $= \text{atan}(1.3/6.9)$ ) 傾いていることになる。つまり、ずれは最大約  $10$  度 (許容差) であり、 $AE_{31}^- \equiv AE_{11}^-$  と見なせる。さらに、CS ピーク値のカテゴリーは、 $S_1$  起因の被害と  $S_1'$  起因の被害 (あったとすれば) は同じカテゴリーとなり、両者の被害は区別できない。これらのことから、本論では、 $As$  系および  $As'$  系のみ考え、 $As''$  系の影響は考えない。

**法線角度の理論値とCSピーク値の対応：**Table 5に、Fig. 11のモデル堤体の、(堤軸法線) 方位角 (Azimuth,  $As$  系: 1列,  $As'$  系: 2列), 震央角度 (Angle to Epicenter) の理論値 (Theo., 同 5・6列), それらの起因となる地震波 (Assumed Seismic Wave, 同 9・10列), および図中の  $AE_{11}^-$ ,  $AE_{11}^+$  の記号 (11列) をゴシック体で表示した。同表には  $S$  波の他、 $P$  波の理論値 ( $P_M \cdot P_S: 45^\circ \cdot 135^\circ$ ,  $P_M' \cdot P_S': 65^\circ \cdot 155^\circ$ ) も記している。

これら理論値に対応する許容差内のCSピーク値 (角度: CS Peak Angle/CS P.Ang.) を 3, 4, 7, 8列に示している。野島 (NJ)  $\cdot$  5町 (5T) 領域の、(堤軸法線) 方位角 (Fig. 6) を 3・4列, 震央角度 (Fig. 4d) を 7・8列に記している。CSピーク値の○内の数字は、各アイテムのCSのピークの大きさの順位である。また、CSピーク値の斜字は準ピーク、○' は準ピークの順位である (5.3. (2) 項)。Table 5には震央角度と同様に断層角度についても記している (12~17列, 5.3. (5) 項)。

震央角度の理論値は、 $As$  系 4 角度 (5列),  $As'$  系 4 角度 (6列) の計 8 角度ある。これに対し、許容差内のCSピーク値は、野島領域 (7列) は 8 角度 (含準ピーク) ないし 6 角度 (準ピーク不含), 5町領域 (7列) は同じく 7 角度ないし 6 角度ある。

As および As' からの S3 波による被害：Table 5 の理論値と CS ピーク値は、両領域ともに同じ程度に合致し、よく対応しているように見える。特に、震央角度の理論値  $0^\circ$  ( $S_3$  波： $S_3$  起因) に対する CS ピーク値 (野島領域：0 度①'・10 度①, 5 町領域：0 度④'・10 度④) は一致、ないし許容差 (10 度) 内にある。しかし、 $S_3$  は As 系であり、発震源 As も、As から  $x_1$  軸直交方向に延びる  $x_3$  軸も海域にある。ここには、ため池はない。As 系の S3 波 ( $S_3$ ) は、ため池被害に無関与となる (被害に無関与しない地震波、理論値は、Table 5 同様、

斜字で表す。5.3. (2) 項)。

したがって、これらの被害は、 $S_3$  以外の起因となる。S3 波としては、 $S_3$  のほかに As' から発する  $S'_3$  がある。これを起因とする震央角度の理論値は  $20^\circ$  である。震央角度の CS ピーク値 10 度 (野島領域①位, 5 町領域④位) は許容差内にあるが、0 度 (野島領域①' 位, 5 町領域④' 位) は許容差を超える。だが、被害は 0 度にも生じている。この理由として次のように考えられる。

S3 波の放射パターン (Fig. 8) の最大動径は、断層破壊方向 ( $x_1$  軸) に対しほぼ直交方向にある。

Table 5 Comparison between the theoretical angles and the CS peak angles for the azimuth of the normal to the dam axis (AZ), the angles to the epicenter (AE) and the angles to the Nojima fault (AF)

| Azimuth (AZ) |     |               |      | Angle to Epicenter (AE) |     |               |      |                      |        |                 | Angle to Nojima Fault (AF) |      |          |                      |        |                                    |
|--------------|-----|---------------|------|-------------------------|-----|---------------|------|----------------------|--------|-----------------|----------------------------|------|----------|----------------------|--------|------------------------------------|
| Theo.        |     | CS Peak Angle |      | Theo.                   |     | CS Peak Angle |      | Assumed Seismic Wave |        |                 | Theo.                      |      | CSP Ang. | Assumed Seismic Wave |        |                                    |
| As           | As' | NJ            | 5T   | As                      | As' | NJ            | 5T   | As                   | As'    | cf. Fig.11      | As                         | As'  | NJ       | As                   | As'    | cf. Fig.11                         |
| (1)          | (2) | (3)           | (4)  | (5)                     | (6) | (7)           | (8)  | (9)                  | (10)   | (11)            | (12)                       | (13) | (14)     | (15)                 | (16)   | (17)                               |
| 50           |     | 50②           | 50③  | 0                       |     | 0①'           | 0④'  | $S_3$                |        | $AE_{11}^\perp$ | 90                         | 90   |          | $S_3$                | $S'_3$ | $AF_{11}^\perp$<br>$AF_{22}^\perp$ |
|              |     |               |      |                         |     | 10①           | 10④  |                      |        |                 |                            |      | 100①     |                      |        |                                    |
|              | 30  | 30①           | 30①  |                         | 20  |               |      |                      | $S'_3$ | $AE_{21}^\perp$ |                            | 110  |          |                      | $S'_3$ | $AF_{21}^\perp$                    |
|              |     |               |      |                         |     | 30③           |      |                      |        |                 | 115                        |      | 120⑦     | $P_M$                |        |                                    |
|              |     |               |      |                         |     |               | 40⑥  |                      |        |                 |                            |      |          |                      |        |                                    |
| 95           |     |               |      | 45                      |     |               |      | $P_M$                |        |                 | 135                        | 135  |          | $P_M$                | $P'_M$ |                                    |
|              |     | 70④           |      |                         |     |               |      |                      |        |                 |                            |      | 140⑥     |                      |        |                                    |
|              | 75  |               |      |                         | 65  |               |      |                      | $P'_M$ |                 |                            | 155  |          |                      | $P'_M$ |                                    |
|              |     |               |      |                         |     | 70④           | 70⑤  |                      |        |                 | 160                        |      | 160④     | $S_1$                |        | $AF_{12}$                          |
| 140          |     |               |      | 90                      |     |               |      | $S_1$                |        | $AE_{11}$       | 0                          | 0    |          | $S_1$                | $S'_1$ | $AF_{11}$<br>$AF_{22}$             |
|              |     | 110⑤          | 110② |                         |     | 100⑤          | 100① |                      |        |                 |                            |      | 10③'     |                      |        |                                    |
|              | 120 |               |      |                         | 110 |               |      |                      | $S'_1$ | $AE_{21}$       |                            | 20   | 20③      |                      | $S'_1$ | $AF_{21}$                          |
|              |     |               |      |                         |     |               |      |                      |        |                 | 25                         |      |          | $P_s$                |        |                                    |
|              |     | 130⑥          |      |                         |     | 130⑥          |      |                      |        |                 |                            |      | 40⑤      |                      |        |                                    |
| 5            |     |               |      | 135                     |     |               |      | $P_s$                |        |                 | 45                         | 45   |          | $P_s$                | $P'_s$ |                                    |
|              |     | 10③           | 10④  |                         |     | 150②          | 140③ |                      |        |                 |                            |      |          |                      |        |                                    |
|              | 165 | 150⑦          | 150⑤ |                         |     |               |      |                      | $P'_s$ |                 |                            | 65   |          |                      | $P'_s$ |                                    |
|              |     |               |      |                         |     | 160②'         | 160② |                      |        |                 | 70                         |      |          | $S_3$                |        | $AF_{12}^\perp$                    |
|              |     |               |      |                         |     |               |      |                      |        |                 |                            |      | 80②      |                      |        |                                    |

NB. 1) Theo.: the theoretical angles for the modeled dams that are located in the most vulnerable positions in respect to seismic waves emphasized due to the radiation pattern,

2) As: center of large slip area near the epicenter, 3) As': center of large slip on the Nojima Fault in Awaji Island, 4) NJ: Nojima area, 5) 5T: 5 town area, 6) ①~⑦: rank order of CS peak values, 7) See the main text and Fig. 11 for further details.

しかし、その放射特性係数（動径）は、最大動径の射出方向から $20^\circ$ ずれても、最大動径の約8割以上 ( $v_r/v_s = 0.9$ のとき最大動径の約9割、同じく $0.5$ のとき約8割)の値を示す。このため、強調された地震波の射出方向より $20^\circ$ ずれた $0$ 度にも、最大被害に準ずる被害を生じさせたと考えられる。すなわち、野島領域の震央角度のCSに、最大ピーク値(10度①位)および準ピーク値( $0$ 度①'位)をもたらした被害は、 $As'$ から発するS3波( $S'_3$ :理論値 $20^\circ$ )に因るものと考えられる。5町領域の震央角度のCSピーク値(10度④位、 $0$ 度④'位)についても同様のことが言える。

**3直線モデルでの震央角度の直交ペア**：1直線モデルでは、震央角度の理論値の直交ペアが2組(「 $0^\circ: S_3$ と $90^\circ: S_1$ 」, 「 $45^\circ: P_M$ と $135^\circ: P_S$ 」)あった。これらは、放射特性(S波・P波ともに直交2方向)から決まる(1)項)。3直線モデルではAs系、 $As'$ 系それぞれに理論値の直交ペアができることになる。As系の直交ペアは、1直線モデルの値を読み替えればよく、2組(「 $0^\circ: S_3$ と $90^\circ: S_1$ 」, 「 $45^\circ: P_M$ と $135^\circ: P_S$ 」)となる。 $As'$ 系は $20^\circ$ ずれた2組(「 $20^\circ: S'_3$ と $110^\circ: S'_1$ 」, 「 $65^\circ: P'_M$ と $155^\circ: P'_S$ 」)が成立する。As系、 $As'$ 系で4組(8角度)の理論値の直交ペアがある。ただし、 $S_3$ は被害に関与しないので、直交ペア3組(7角度)となる。

Table 5のCSピーク値と理論値との、さらなる整合性を確認するために、(2)項で提示した「CSピーク値の直交ペア」(i)～(vi)に対し、許容差内の「理論値の直交ペア」、およびその起因の地震波を組み合わせる。このような直交ペアを「3直線モデルでの直交ペア」と呼ぶことにする。この場合「震央角度の3直線モデルでの直交ペア」である。

野島領域における(i)～(iii)は、

- (i) 10度① ( $a. 0^\circ: S_3/b. 20^\circ: S'_3$ )と100度⑤ ( $a. 90^\circ: S_1/b. 110^\circ: S'_1$ ),
- (ii) 30度③ ( $a. 20^\circ: S'_3/b. 45^\circ: P_M$ )と130度⑥ ( $a. 110^\circ: S'_1/b. 135^\circ: P_S$ ),
- (iii) 70度④ ( $65^\circ: P'_M$ )と150度② ( $155^\circ: P'_S$ ), と

なる。各項の表記は、CSピーク値、CSピーク値順位

(丸数字：ピークのCSの大きさの順位, Fig. 4d)である。( )内の値は対応する理論値の角度( $^\circ$ )および起因地震波である。理論値で「/」で示される値は、CSピーク値に対し理論値が複数個あるもの、理論値の斜字はCSピーク値と理論値とが許容差( $\pm 10$ 度)を超える値、あるいは被害に関与しない地震波である。

(i) aの $S_3$ (海域射出)は被害に無関与であり、3直線モデルでの直交ペアは成立しない。ただし、100度⑤は両系のS1波( $S_1 \cdot S'_1$ )の被害が重畳したと考えられる。以下、この組み合わせについては表記するが、直交ペアとしては論議の対象にしない。(i) bは $As'$ 系のS1波、(iii)は $As'$ 系のP波による3直線モデルでの直交ペアが成立している。しかし(ii)は、CSピーク値の直交ペアに対し、理論値の直交ペアは、a、bとも、1角度が許容差を超え、3直線モデルでの直交ペアは成立しない。野島領域では、震央角度の3直線モデルの直交ペアが2組成立したことになる。

5町領域の3直線モデルでの震央角度の直交ペアは、

- (iv) 10度④ ( $a. 0^\circ: S_3/b. 20^\circ: S'_3$ )と100度① ( $a. 90^\circ: S_1/b. 110^\circ: S'_1$ ),
- (v) 40度⑥ ( $45^\circ: P_M$ )と140度③ ( $135^\circ: P_S$ ),
- (vi) 70度⑤ ( $65^\circ: P'_M$ )と160度② ( $155^\circ: P'_S$ ),

と、3組成立している。(iv) bは $As'$ 系のS波起因、(v)はAs系のP波起因、(vi)は $As'$ 系のP波起因となる。このように、7地震波が、それぞれ被害に関与したことになる。

震央角度の3直線モデルでの直交ペアは、理論値の直交ペア4組( $S_3$ を含むので実質的には3組)に対し、野島領域で2組、5町領域では3組成立している。理論値とCSピーク値の単独比較(野島・5町領域：8・7角度が許容差内：含準ピーク)に比べ、3直線モデルでの直交ペアの比較では、両領域の差異があるように見える。

#### (5) 3直線モデルでの断層角度の理論値とCSピーク値

**断層角度の同域と異域**：Fig. 11には、(放射特性により強調されたS波の被害を最も受け易い)

モデル堤体の震央角度とともに断層角度の値も示した。断層角度についても、震央角度で述べた、一般化した表記を用いて論議する。

「モデル堤体の断層角度」( $AF_{ij} \cdot AF_{ij}^\perp$ )が「断層角度の理論値」となる。これらの断層角度の理論値は、堤体の位置と基準線の位置によって2つに分けられる。一つは、堤軸がNix軸に一致・直交するモデル堤体を、同じ区間のNix軸の法線を基準として求めた $AF_{ii} \cdot AF_{ii}^\perp$  ( $i=1, 2, 3$ )である。他の一つは、堤軸がNix軸に一致・直交するモデル堤体を、異なる軸のNjx軸(またはその延長線、以下同じ)の法線を基準にした $AF_{ij} \cdot AF_{ij}^\perp$  ( $i \neq j; i, j=1, 2, 3$ )である。前者を「同域」の理論値、後者を「異域」の理論値と呼ぶ。

同域では、堤軸がNix軸に一致するモデル堤体の理論値 $AF_{ii}$ 、つまりFig. 11における、堤体配置(a)の $AF_{11}$ 、(b)・(d)の $AF_{22}$ 、(c)の $AF_{33}$ は、すべて $0^\circ$ となる。また、堤軸がNix軸に直交するモデル堤体の理論値 $AF_{ii}^\perp$ 、つまり、堤体配置(f)の $AF_{11}^\perp$ 、(e)・(g)の $AF_{22}^\perp$ 、(h)の $AF_{33}^\perp$ は、すべて $90^\circ$ となる。

異域の理論値はやや複雑になる。堤軸がNix軸に一致するモデル堤体を、Njx軸の法線を基準に求めた断層角度の理論値 $AF_{ij}$ は次のようになる。Fig. 11の堤体配置(a)は $AF_{12} = 160^\circ$ 、(b)は $AF_{21} = 20^\circ$ 、(c)は $AF_{32} = 160^\circ$ 、(d)は $AF_{23} = 20^\circ$ となる。また、堤軸がNix軸に直交する堤体を、Njx軸の法線を基準にした断層角度の理論値 $AF_{ij}^\perp$ は次のようになる。堤体配置(e)は $AF_{21}^\perp = 110^\circ$ 、(f)は $AF_{12}^\perp = 70^\circ$ 、(g)は $AF_{23}^\perp = 110^\circ$ 、(h)は $AF_{32}^\perp = 70^\circ$ となる。異域の理論値には、同域の理論値と区別するため上記のように下線を付けた。

$AF_{ij}$ 、 $AF_{ij}^\perp$ はAs系であり、 $AF_{2j}$ 、 $AF_{2j}^\perp$ はAs'系である。これらの同域・異域の断層角度の理論値を、Table 5にAs系(12列)、As'系(13列)として示した。同表には、P波起因のAs・As'系同域(12・13列)の $135^\circ$ ( $P_M \cdot P'_M$ )、 $45^\circ$ ( $P_S \cdot P'_S$ )、およびAs系異域(12列)の $115^\circ$ ( $P_M$ )、 $25^\circ$ ( $P_S$ )、As'系異域(13列)の $155^\circ$ ( $P'_M$ )、 $65^\circ$ ( $P'_S$ )も記した。

理論値としてはAs系8角度、As'系8角度と、

16角度できる。ただし、同域については、As系とAs'系と同じ角度が4角度( $0 \cdot 45 \cdot 90 \cdot 135^\circ$ )ある。また、異域には差が $5^\circ$ の理論値が4組ある。この内3組はCSピーク値に対応する。すなわち、CSピーク値、20度( $S'_1: 20^\circ/P'_S: 25^\circ$ )、120度( $S'_3: 110^\circ/P'_M: 115^\circ$ )、160度( $S'_1: 160^\circ/P'_M: 155^\circ$ )である。これらは、起因地震波は異なるが、被害を生じるCSピーク値は同じとなる。また、残る1組( $S_3: 70^\circ/P'_S: 65^\circ$ )に近いCSピーク値としては80度があるが、許容差(10度)内は $70^\circ$ のみで、 $65^\circ$ は許容差を超える。

**3直線モデルでの断層角度の直交ペア**：断層角度のCSピーク値の直交ペアは、準ピーク(5.3.(2)項)10度③'と120度⑦'を、考慮すると4組、考慮しないと3組できる。これら「CSピーク値の直交ペア」と許容差内の「理論値の直交ペア」を組み合わせた、「直交ペア」は次のようになる。

CSピーク値の直交ペアが3組の場合、震央角度と同様の表記で、

- (i)' 20度③ ( $20^\circ: S'_1$ )と100度① ( $110^\circ: S'_3$ ),
- (ii)' 40度⑤ ( $45^\circ: P_S \cdot P'_S$ )と140度⑥ ( $135^\circ: P_M \cdot P'_M$ ),
- (iii)' 80度② ( $70^\circ: S_3$ )と160度④ ( $160^\circ: S_1$ ),

となる。(i)'がAs'系異域のS波の、(ii)'がAs系・As'系同域のP波のペアが成立する。しかし、(iii)'は $S_3$ を含むので、「3直線モデルにおける直交ペア」は2組となる。

準ピークも考慮する場合、(ii)'と(iii)'は上記と同じだが、(i)'が下記の(iα)'と(iβ)'に分かれる。

- (iα)' 10度③' ( $0^\circ: S_1 \cdot S'_1$ )と100度① ( $90^\circ: S_3 \cdot S'_3$ ),

- (iβ)' 20度③ ( $20^\circ: S'_1$ )と120度⑦ ( $110^\circ: S'_3$ )

である。(iα)'がAs'系同域の、(iβ)'はAs'系異域の、S波に由るものである。このとき、(iα)', (iβ)', (ii)'の3組の3直線モデルでの直交ペアが成立したことになる。

断層角度は、7ないし8角度(含準ピーク)が許容差内の理論値に対応している(Table 5, 5.3.(2)項)。これらに対し、「断層角度の3直線モデルでの直交ペア」が2組ないし3組(含準ピーク)成立したことになる。

### (6) 野島領域における3直線モデルの震央角度と断層角度

同一地震波を受ける堤体の震央角度と断層角度のペア：1直線モデルでは、モデル堤体の震央角度と断層角度(両者の理論値)には直交関係があった(5.3.(1)項)。3直線モデルの場合、震央角度の理論値は、N1x軸およびその延長線を基準線とし、モデル堤体の堤軸法線との交角としている。As・As'系の放射特性によって強調された8地震波(被害関与は7地震波)に対し、被害を受け易いモデル堤体の震央角度も8角度(同7角度)ある。

これに対し、断層角度の理論値は、同域と異域があるから、各地震波に対して2角度ずつ16角度できる(前項)。この内、As・As'領域とも同域の4角度(0・45・90・135°)は重複するので(Table 5)、断層角度の理論値は12角度となる。理論値は、震央角度2角度に断層角度3角度が対応することになる。両者は必ずしも直交とはならない。

Table 6に、Table 5に基づき同一地震波を受けるモデル堤体の、震央角度と断層角度の理論値を組み合わせた。それらの許容差(10度)内のCSピーク値を対応させて示す。この組合せを、「3直線モデルにおける同一地震波に対する震央・断層角度のペア」、あるいは単に「(3直線モデルの)震央・断層角度のペア」と呼ぶことにする。

表記は、As・As'系の8地震波(2列)に対する、震央角度(3~6列)の理論値(3列)、許容差内のCSピーク値およびその大きさの順位(丸数字)(4列)、そのカテゴリーのサンプル数(5列)およびその多さの順位(6列)である。断層角度(7~10列)についても同様の順で示す。4・8列の斜字は、Table 5と同様準ピークを表わす(5.3.(2)項)。同じく太字は、「3直線モデルの震央・断層角度のペア」のCSピーク値である。また、断層角度の理論値の下線は、異域(5.3.(5)項)の値を表す。

v)のペアのS<sub>3</sub>は、Asが海域にあるので被害に関与しない。震央角度0~30度の被害はS<sub>3</sub>'によるものとした(5.3.(4)項)。一つの震央角度(または断層角度)に対し、複数の断層角度(または

震央角度)が対応する場合、それぞれを一組のペアと考える。

Table 6の組合せの内、i)・ii)のS<sub>1</sub>・S<sub>1</sub>'起因の震央角度100度は、2つの断層角度と直交ペア(100-10度、100-20度)を成している。また断層角度のCSピーク値160度は、理論値160°(i)、155°(viii)に対応している。表記上、同じ値を両方に記し、i)をカッコ書きで示している。なお文中のローマ数字および地震波の midpoint「・」は、2つの地震波および理論値が、1つのCSピーク値に対応することを表す。

3直線モデルの震央・断層角度のペアは、準ピークを含めると、7組:i) 100-10度, ii) 100-20度, iii) 130-40度, v) 0-80度, vi a) 10-100度, vi b) 30-120度, viii) 70-160度, 成立している。準ピークを含めなければ、ii), vi a), viii)の3組となる。

震央・断層角度のCSピーク値の直交ペアとCSの順位およびサンプル数：モデル堤体では、震央角度と断層角度とは直交関係がある(Figs. 10・11)。実際のため池でも、モデル堤体に近い配置であれば、その震央角度と断層角度とは、基準線が異なっても直交、あるいはほぼ直交になる筈である。このとき、震央角度のあるカテゴリーの被害数と、それに直交する断層角度のカテゴリーの被害数は一致する。したがって、両者のCSの相対的順位も一致する筈である。

実際の震央角度と断層角度の計測値は、個々の堤体によって異なる基準線に基づいて測定されている(2.2.(2)・5.3.(7)項)。「震央・断層角度の直交ペア」の各カテゴリーの、サンプル数や、CS順位が一致するとは限らない。しかしながら、Table 6の震央・断層角度の直交ペア7組の内、v)・vi) (震央角度10度①位-断層角度100度①位、以下略記)と、viii) (70④-160度④)とはCSピーク値の順位が一致している。

一方、i)・ii) (100⑤-10度③')は、サンプル数は一致(26個、Table 6, 5・9列)しているが、CS順位は異なる。CS順位が①位である、vi)の震央角度10度のサンプル数は、11個で、表の8カテゴリーの中で最も少ない(8番目、同6列)。対する断層角度100度も、サンプル数は15個で、

**Table 6** Orthogonal pairs between the angle to the epicenter and that to the Nojima fault, for the dams received the same seismic waves

| Assumed Seismic Wave |                 | Angle to Epicenter |                     |                   |         | Angle to Fault |                      |                    |                   |
|----------------------|-----------------|--------------------|---------------------|-------------------|---------|----------------|----------------------|--------------------|-------------------|
|                      |                 | Theo. (°)          | CS Peak Angle (CSP) |                   |         | Theo. (°)      | CS Peak Angle (CSP)  |                    |                   |
|                      |                 |                    | (deg.)              | Numbers of Sample | Ranking |                | (deg.)               | Numbers of Sample  | Ranking           |
| (1)                  | (2)             | (3)                | (4)                 | (5)               | (6)     | (7)            | (8)                  | (9)                | (10)              |
| i)                   | S <sub>1</sub>  | 90                 | 100⑤                | 26                | 4       | 160            | (160④) <sup>4)</sup> | (27) <sup>4)</sup> | (2) <sup>4)</sup> |
|                      |                 |                    |                     |                   |         | 0              | 10③'                 | 26                 | 3                 |
| ii)                  | S' <sub>1</sub> | 110                |                     |                   |         | 20             |                      |                    |                   |
| iii)                 | P <sub>s</sub>  | 135                | 130⑥                | 31                | 2       | 25             | 20③                  | 32                 | 1                 |
|                      |                 |                    |                     |                   |         | 45             | 40⑤                  | 25                 | 4                 |
| iv)                  | P' <sub>s</sub> | 155                | 150②                | 15                | 7       | 65             | -                    | -                  | -                 |
|                      |                 |                    | 160②'               | 30                | 3       |                |                      |                    |                   |
| v)                   | S <sub>3</sub>  | 0                  | 0①'                 | 16                | 6       | 70             | 80②                  | 12                 | 8                 |
| vi)                  | S' <sub>3</sub> | 20                 | 10①                 | 11                | 8       | 90             | 100①                 | 15                 | 7                 |
|                      |                 |                    | 30③                 | 22                | 5       | 110            | 120⑦                 | 25                 | 4                 |
|                      |                 |                    |                     |                   |         |                |                      |                    |                   |
| vii)                 | P <sub>M</sub>  | 45                 | -                   | -                 | -       | 115            | 140⑥                 | 18                 | 6                 |
| viii)                | P' <sub>M</sub> | 65                 | 70④                 | 33                | 1       | 135            | 160④                 | 27                 | 2                 |
|                      |                 |                    |                     |                   |         | 155            |                      |                    |                   |

NB. 1) the theoretical values in columns (3) and (7), corresponding seismic wave in col. (2), 2) CS peak angles in col. (4) and (8), 3) number of samples in the category in col. (5) and (9), and their rank order in col. (6) and (10), 4) duplicate with viii). 5) See the main text for further details.

表の10カテゴリーの7番目(同10列)と少ない。他方、CS順位④位で一致する viii) の、震央角度70度のサンプル数は33個で、震央角度では最も多い。対する断層角度160度も27個で、断層角度では2番目に多い。

これらのことから、次のように考えられる。CSピーク値順位の上位(大きな被害⇨大きな地動加速度)の堤体では、サンプル数が少なくても理論通りの結果(震央・断層角度の直交ペアのCS順位は一致:vi)が得られる。また、CSピーク値順位が下位(被害小⇨地動加速度小)でも、サンプル数が多ければ理論通りの結果(CS順位が一致:viii)が得られている。一方、震央・断層角度の直交ペアのサンプル数が、かなり多く(26個)、かつ一致していても、CS順位(⑤-③'位)が低い(被害小⇨地動加速度小)と、両角度のCS順位が異なり、理論通りにならない(i)・ii)。

このように問題点があるにせよ、両角度のCSピーク値と、理論値が合致する7組の震央・断層角度の直交ペアができた。しかも、その計測値は異なる基準(震央角度は震央、断層角度は野島断

層)から得ている。そして、その内、震央・断層角度の直交ペア2組のCSピーク値順位が一致した。これら一致・不一致の要因は、地動加速度の大きさと、サンプル数に関わると言えそうである。これらのことは、本研究における震央角度と断層角度の、統計値としての信頼性と問題点が知れるとともに、それらの合理的な解釈ができたと言える。そして、適用した「放射特性に基づく仮説」の蓋然性を補強できたと言えよう。

### (7) 震央角度と断層角度の基準線

**野島領域における震央角度および断層角度の基準線**：前項で見たように、「震央・断層角度の直交ペア」は7組成立した。許容差を設定したとはいえ、よく合致したと言える。しかし、各堤体の震央角度および断層角度の、計測値の堤軸法線は共通だが、両角度の基準線は異なる。すなわち、震央角度の基準は「震央」(点)(4.2節)であり、断層角度の基準は「野島断層」(曲線)である。「野島断層」は、1/2.5万の活断層図(国土地理院、1996b)から、地表野島断層をトレースしデジタ

ル化している。

基準線方位角も、震央角度（各堤軸中心Cと震央Eを結んだ直線CEの方位角 $\theta_{CE}$ ）と、断層角度（各堤軸中心Cからの、野島断層上の最近点Nにおける法線方位角 $\theta_{CN}$ ）とは異なる（2.2. (2)・5.3. (2) 項）。そして、両基準線は堤体ごとに変わる。にもかかわらず、「震央・断層角度の直交ペア」が7組も成立していることは、いささか奇異に感じられる。ここで、両角度の基準線のばらつきについて検証しておく。

**野島領域での堤体の堤軸（中心）法線方位角 $\theta_C$ ：**野島領域のため池395個の（堤軸法線）方位角 $\theta_C$ は、1度から180度（180度表示）の範囲にほぼ均等に分布していた（平均値96.2度、標準偏差51.7度）。各ため池は、三方を海に囲まれた野島領域（5町領域も同様）の、さまざまな地形・地域に造られている（Fig. 1）。そして多くのため池の堤軸は、（無数の）谷川（地形）を直交するように造られており、各谷川は三方の海に注ぐ。堤軸法線の向きが全方位に分布しているのは当然と言える。

**野島領域での震央角度の基準線方位角 $\theta_{CE}$ ：**これら各堤体の震央角度の基準線方位角 $\theta_{CE}$ は、26～81度の範囲（56度）に分布していた。しかし、その平均値（ $Av$ ）は43.8度であり、1直線モデルでの震央角度の基準線の方位角40°（Fig. 10）に近い（カテゴリーは同じ40度）。その標準偏差（ $\sigma$ ）は12.9度であった。統計学的には、サンプル（ここでは基準線方位角 $\theta_{CE}$ ）が正規分布していれば、 $\theta_{CE}$ は、30.9～56.7度（ $Av \pm \sigma$ ）の範囲内に約7割（68.3%）のサンプルが収まることになる。この範囲内の実際のため池数は268個であった。全体の67.8%となり、正規分布の68.3%より0.5ポイント少ないがほぼ同じとしてよい。

**野島領域での断層角度の基準線方位角 $\theta_{CN}$ ：**各堤体の断層角度の基準線方位角 $\theta_{CN}$ は、113～147度（35度）の範囲に分布していた。平均値 $Av$ は132.5度で、1直線モデルの断層角度の基準線の方位角130°に近い（カテゴリーは同じ130度）。また、標準偏差 $\sigma$ は7.8度であった。「 $Av \pm \sigma$ 」（124.9～140.6度）の範囲のため池数は、361個（全体の91.4%）を占める。正規分布の68.3%より23.1ポイ

ント、上述の震央角度の場合（67.8%）より23.6ポイント多い。

このように、野島領域における震央角度・断層角度の基準線方位角 $\theta_{CE} \cdot \theta_{CN}$ の平均値（43.8度・132.7度）は、それぞれ1直線モデルにおける基準線の理論値（40°・130°）にはほぼ等しい（カテゴリーは同じ）。結果的に、両者の平均値は直交関係（差88.9度＝132.7－43.8）となり、理論値90°と一致しているとしてよい。前項の「震央・断層角度の直交ペア」（7組成立）の結果は首肯できる。

他方、両角度の基準線は、分布範囲（震央角度：55度>断層角度37度）も標準偏差（12.8度>7.8度）も断層角度の方が小さい。また、「 $Av \pm \sigma$ 」の範囲内のサンプル数は、断層角度の方が1.35倍多い（268<361個）。これら両角度の、被害に関わる理論値の直交ペアは、3組（7角度、 $S_3$ は関与しない）ある（(4)・(5) 項）。これに対し、CSピーク値の直交ペアは、震央角度2組（4角度）、断層角度3組（6角度）と両者には差があった。この差は、上記の両角度の基準線のばらつきの差に起因するものとしても否定できない。

**5町領域における震央角度の基準線方位角 $\theta_{CE}$ ：**5町領域のサンプル数（1562個）は、野島領域（395個）より約4倍多い。しかし、基準線方位角 $\theta_{CE}$ の分布範囲は、野島領域と同じ（26～81度）である。その平均値 $Av$ は44.0度であり、野島領域（43.8度）と同じとしてよく、理論値の基準線方位角40°に近い（カテゴリーは同じ40度）。一方、5町領域の標準偏差 $\sigma$ （8.1度）は、野島領域（12.9度）より約5度小さくなり、精度は上がってくる。「 $Av \pm \sigma$ 」（35.9～52.1度）のため池数は1199個（全体の76.8%）を占める。正規分布の68.3%より8.5ポイント、野島領域（67.8%）より9ポイント大きい。

つまり、5町領域の震央角度の基準線のばらつきは、サンプル数が多いため、野島領域に比べ小さい。これに基づいて算定された震央角度の計測値のばらつきも小さくなる。これら、サンプル数・基準線のばらつきの異なる計測値を用いて得た統計値（多変量解析結果）の差が、両領域における震央角度の直交ペアの成立数差（理論値3組7角



度に対し、野島領域：2組4角度，5町領域：3組6角度，(4)項)に現れたと考えられる。

## 6. 総合的論議

### 6.1 各地震波に起因する被害

#### (1) 概説

本章では、いくつかの視点から、今までの論議を整理する。ここでは、個別に述べた各地震アイテム(震央距離・断層距離・震央角度・断層角度)の主な被害特性を、地震波の視点から整理、検討する。これら地震アイテムの被害を、前章では「放射特性に基づく仮説」(5.1~5.3節)により論じた。「兵庫県南部地震による淡路島北部のため池堤体の被害は、放射特性によって強調された地震波(地動加速度)によって生じた」とする考え方である。論議した地震波は、「放射特性で強調された、S波およびP波」である。本論では、これらを単にS波、P波と呼ぶことが多い。

これら地震波による被害のメカニズムを検討するために、「1直線モデル」および「3直線モデル」を設定した。1直線モデルとして、野島断層を1本の直線(N40°E)で近似し、これに平行な直線を $x_1$ 軸とした。その原点を(現)震央(4章)とし、大すべり領域の中心 $As$ と見なせるとした。しかし、CSピーク値(角度)数は、1直線モデルの地震波の理論値数より多い。被害状況から20度ずれた別の系の存在が想定された(5.3.(3)項)。

改めて、野島断層を3本の直線(N1・N2・N3)で近似し、これに平行な3直線をN1x・N2x・N3x軸(N50・30・50°E)とする3直線モデルを設定した。原点は1直線モデルと同じく震央(=As)とし、基準線をN1x軸およびその延長線とした。Asとは別のすべり領域の中心「As'」がN2区間(N2x軸上)に存在することになる。なおN2区間は、一部(震央距離でカテゴリ9km区間)が震度7地帯と重なっている(5.3.(3)項)。

AsおよびAs'からの地震波が堤体に被害を及ぼしたことになる。それぞれの地震波をAs系、As'系と呼んでいる。As系つまりN3x軸上に発震源As''(大すべり領域の中心)がありうる。As''系があるとすれば、S1波の射出方向は、As系と

平行になる。CSピーク値からは、両者の被害は分別できない。また、引用した震源過程解析例(Table 3, g・i・k列, 5.1.(1)項)には、-13km超(N3区間に相当)には大すべり(An)領域はない。これらのことから、As''は実際の被害に関与しないとした(5.3.(4)項)。

想定したAs(震央付近)、As'(N2x軸上)の位置は、震源過程解析結果例(Table 3)と比較検討し(5.3.(3)項)、3直線モデルの設定は許されることとした。ため池堤体の被害は、AsおよびAs'からの、S波(軸方向へのS1波、軸直交方向へのS3波)、ならびにP波(軸斜交の山側への $P_M$ 、海側へ $P_S$ )によって生じたこととなる。理論上、それぞれの地動加速度(地震波)を最も受ける堤体配置を「モデル堤体」としている(Figs. 10・11)。それらモデル堤体の震央角度、断層角度が3直線モデルの理論値となる(Table 5)。

#### (2) 断層走向直交方向のS波(S3波)

論議の流れから、S3波より論述する。S3波には、As・As'から断層の両側、N1x・N2x軸直交方向へ射出する $S_3$ ・ $S'_3$ がある。 $S_3$ は、Asおよび射出方向が海域にあることから、被害に無関与とした(5.3.(4)項)。As'からN2x軸の両側直交方向に射出した $S'_3$ により、被害を受けるモデル堤体の震央角度は20°、断層角度は90°(同域)と110°(異域)となる(Table 5, Fig. 11: 5.3.(5)項)。理論値に対し許容差(10度)内の、震央角度のCSピーク値は、野島領域では10度①と30度③、5町領域では10度④がある。同じく、断層角度には100度①、120度⑦がある。ここでの丸数字は、各アイテム毎のCSピーク値の大きさの順位である。

$S'_3$ 起因の震央・断層角度の直交ペア(野島領域のみ)が、a)  $S'_3$ による10度①(20°)・100度①(90°、110°)、b)  $S'_3$ による30度③(20°)・120度⑦(110°)の2組成立した(Table 6, 5.3.(6)項)。a)のCS順位は、両者同位の①位である。異なる基準で得た震央角度、断層角度の計測値を用いて、このような結果を得たことは、 $S'_3$ の被害への関与の大きさとともに、多変量解析の結果の信頼性を増す(5.3.(6)項)。

$S_3$ は、その放射特性と距離減衰から、断層距離の極小値(断層距離250 m, 実質的な1直線モデルの $x_1$ 軸, 3直線モデルの場合は $N2x$ 軸)を挟んで両側に2つの山型のCS曲線を作る(Fig. 9, 5.2. (2)項)。この2つのCS曲線は、極小値をピークとする緩やかなCS曲線(折れ線: 図中の破線)とは明らかに異質である。 $S_1$ 起因の緩やかなCS曲線に、 $S_3$ 起因の2つのピークを持つCS曲線が重畳したと考えられる。そして、断層距離1000 mでCS曲線の勾配は急に緩やかになる。このことは、 $S_3$ の放射特性による、ため池堤体への被害の影響は1000 mではほぼ完結したと考えられる。つまり1000 mにおける勾配の急変点は、 $As'$ から発する $S3$ 波( $S_3$ )の、被害への関与の終端部を表すと言える。また、 $As'$ から発する $S_3$ は、震央距離9 kmの被害の一端を担った可能性がある。

### (3) 断層走向方向のS波(S1波)

S1波には、 $As \cdot As'$ から、断層走向方向へ射出する $S_1 \cdot S_1'$ があると(Figs. 10・11)。被害をこうむるモデル堤体の震央角度は $90^\circ \cdot 110^\circ$ 、断層角度は $0^\circ$ (同域)および $20^\circ \cdot 160^\circ$ (異域)である。対応するCSピーク値は、震央角度が100度(野島⑤, 5町①), 断層角度(野島のみ)が20度③, 10度③', 160度④となる。また、野島領域において $S_1 \cdot S_1'$ は、震央・断層角度の直交ペア「100度⑤( $90^\circ/110^\circ$ )・10度③'/20度③( $0^\circ/20^\circ$ )」(「/」は両角度が関わる)を成立させる。

そして、S1波は、その放射特性による影響幅の増大と距離減衰から、震央距離9 kmに最大CSを生じさせる。震央距離のCS曲線は、野島領域が12 km, 5町領域が30 kmまでである。12 kmまでは両曲線はよく似ている(Fig. 4b)。野島領域は5町領域の一部であり、同じ地震波を受けるのだから当然と言える。CS曲線は9 kmを過ぎると下降に転ずる。距離減衰の影響が、放射特性の影響を上回ることを意味する。また、S1波は、断層距離250 mにおける極小値をピークとする、緩やかで大きな放物線状のCS曲線をもたらす主因とした(Fig. 9, 5.2. (2)項)。これらの被害には $S_1$ と共に $S_1'$ も関与していると考えられる。

**震央距離と断層距離のCS曲線の類似**：震央距離のCS曲線(Fig. 4b)は、カテゴリ9 km(実距離9~12 km未満, 以下数値のみ)でピークとなり、下降に転じる。12(12~15) km, 15(15~18) kmと進むにつれ、下降勾配は大きくなるが、18(18~21) kmになると急に緩やかになる。つまり、下降勾配は18 kmで急変する。この性状は、規模、様相は異なるものの、上述の断層距離(Fig. 9)の1000 mにおけるCS曲線の急変点の性状に似ている。すなわち断層距離では、 $As$ からのS1波( $S_1$ )の被害(緩やかなCS曲線)に、 $As'$ からの $S_3$ 波( $S_3$ )の被害が重なり、その終端部の1000 mで勾配が急変したとした。

震央距離の場合、 $As$ からの $S_1$ 起因の被害に、 $As'$ からの $S_1'$ 起因の被害が重畳したと考えられる。震央距離18 kmになると、 $S_1'$ 起因の被害はなくなりCSの勾配が変化したと考えることができる。このとき、 $S_1$ と $S_1'$ に由る被害が重畳した範囲は、 $9 \cdot 12 \cdot 15 \cdot 18$  kmの4カテゴリ( $As'$ からだ)と $3 \cdot 6 \cdot 9$  kmの3カテゴリ)となる。

**放射特性による $As'$ からのS1波の影響範囲の推定**：断層距離のCS曲線の極小値は250 m(実距離約400 m)にあった。なお、以下の論議は、実距離で論じて、カテゴリ距離で論じても結果的には、同じであった。ここでは簡単のためカテゴリ距離で論ずる。3直線モデルでは $N2x$ 軸からの距離となる(5.2. (2)・5.3. (3)項)。この位置が実質的な $N2x$ 軸と見なせる。 $S_3$ が被害を及ぼす断層距離の範囲(急変点の1000 mまで)は、実質的な軸から750(=1000-250) mとなる。 $As'$ からは、 $S_3$ とともに、 $S_1$ を射出している。移動震源のS1波の放射特性係数(Fig. 8)は、S3波のそれの約2倍(断層破壊速度 $v_r/S$ 波速度 $v_s=0.5$ のとき)、ないし約9倍( $v_r/v_s=0.9$ )である。

したがって、 $As'$ からのS1波による被害が及ぶ震央距離の範囲は、約1.5 km(=750 m × 2)ないし約7 km(=750 m × 9)となる。 $As'$ が存在すると考えられる9(9~12) kmから、急変点までの実距離は、前者なら10.5~13.5 km, 後者なら16~19 kmとなる。カテゴリでは、 $9 \cdot 12$  kmか $15 \cdot 18$  kmである。この放射特性係数から

求めた  $S_1'$  が被害を及ぼしたカテゴリーは、上述の震央距離の CS 曲線の形状から論じた  $S_1'$  の被害範囲 (9・12・15・18 km) 内にある。これらことから、 $As'$  が震央距離 9 km にあり、 $As'$  からの S1 波 ( $S_1'$ ) による被害範囲は少なくとも 12 km ( $As'$  から 3 km)、多くて 18 km ( $As'$  から 9 km) となる。上記の項の、震央距離の CS 曲線 (被害状況) から論じた、 $S_1'$  の被害への影響範囲 (9・12・15・18 km :  $As'$  から 3・6・9 km) とは矛盾しない。

また、震央距離の CS 曲線には、ピーク 9 km の手前の、6 (6~9) km のやや急な登り勾配、その後の 9 (9~12) km のやや緩やかな下降勾配がある。この 9 km 前後の非対称な勾配の変化は、9 km 付近にあるとした  $As'$  からの、S1 波 ( $S_1'$ ) の放射特性と距離減衰により生じた被害を反映している可能性がある。

#### (4) 斜交の波 (P 波)

**As および  $As'$  からの P 波** : 静止 (点) 震源からの P 波は、軸に対し両側に斜交 ( $\pm 45^\circ$ ) 方向に射出される (Fig. 8a)。これに比べ、移動震源の放射方向は  $41^\circ$  ( $v_r/v_s=0.5$  のとき) ないし  $38^\circ$  ( $v_r/v_s=0.9$ ) とやや小さい (Fig. 8b・c)。しかし、CS ピーク値を論ずるときの影響は少ないとした。P 波には、 $As$  からの  $P(P_M \cdot P_S)$ 、 $As'$  からの  $P'(P'_M \cdot P'_S)$  がある (5.3.(3) 項)。添字の M が軸に対して山側、S が海側へ射出する P 波を表す (5.3.(1) 項)。

海域にある  $As$  からの、断層走向直交方向へ発する S3 波 ( $S_3$ ) は、被害に無関与とした。しかし、 $As$  からの P 波 ( $P_M \cdot P_S$ ) は、斜交であるので、陸域にも作用する。P 波は圧縮波だから、射出方向に正対する堤体に、最も被害を与える。このモデル堤体の、震央角度は  $45^\circ$  ( $P_M$ ) と  $135^\circ$  ( $P_S$ ) である (Fig. 10)。許容差内の震央角度の CS ピーク値は、5 町領域では 40 度⑥と 140 度③に、野島領域は 130 度⑥のみにある (Table 5, 5.3.(5) 項)。 $As'$  からの  $P'(P'_M \cdot P'_S)$  に対するモデル堤体の震央角度は、 $65^\circ \cdot 155^\circ$  である。許容差内の CS ピーク値は、野島領域 (70 度④・150 度②)、5 町領域 (70 度⑤・160 度②) とともにほぼ同順位で被害に関わっ

ている。

断層角度 (野島領域のみ) の理論値は、同域と異域とがある (5.3.(5) 項)。 $As$  系、 $As'$  系とも、同角度である同域の理論値、 $45^\circ$  ( $P_S$ ) と  $135^\circ$  ( $P_M$ ) に対し、CS ピーク値は 40 度⑤と 140 度⑥がある (Table 5, 5.3.(6) 項)。異域の理論値としては、 $As$  系の  $25^\circ$  ( $P_S$ ) と  $115^\circ$  ( $P_M$ )、 $As'$  系の  $65^\circ$  ( $P'_S$ ) と  $155^\circ$  ( $P'_M$ ) とがある。これらに対し、許容差内の断層角度の CS ピーク値は、 $As$  系が 20 度③と 120 度⑦、 $As'$  系が 160 度④にある。この  $As'$  からの  $P'$  も、 $S'_3$  とともに断層距離の (2 つの山型の CS 曲線出現させた) 被害に寄与した可能性がある (5.3.(4) 項)。

**P 波起因の震央角度と断層角度の直交ペア** : P 波起因の震央・断層角度の直交ペアは 2 組成立している。a)  $P_S$  起因同域の 130 度⑥ ( $135^\circ$ )・40 度⑤ ( $45^\circ$ ) と、b)  $P'_M$  起因異域の 70 度④ ( $65^\circ$ )・160 度④ ( $155^\circ$ ) である (Table 6, 5.3.(6) 項)。b) は、両角度の CS 順位一致している。このような例は、最も CS 順位の高い (地動加速度の大きい)、 $S'_3$  起因の 10 度① ( $20^\circ$ )・100 度① ( $90^\circ/110^\circ$ ) のみである。一方、④位でありながら震央角度・断層角度の CS 順位が一致したのは、サンプル数 (33・27 個) の多さ (8 カテゴリー中 : 1・2 番目) によると考えられる。なお、①位の震央・断層角度の直交ペア (10 度①・100 度① :  $S'_3$  起因) のサンプル数 (11・15 個) は、最小・それに準ずるもの (8・7 番目) であった。

つまり、同一地震波を受けるが、計測基準の異なる震央角度・断層角度の直交ペアの順位的一致・不一致は、サンプル数の大小、加速度の大小に由ると言える (Table 6, 5.3.(6) 項)。このことは、前述のように「放射特性に基づく仮説」の蓋然性を裏付けるとともに、計測値の信頼性と限界を教える。

**As 起因および  $As'$  起因の P 波による被害の差異** : 5 町領域の震央角度において、 $P_M \cdot P_S$  ( $As$  より発震) 起因の 2CS ピーク値 (40 度⑥・140 度③) の CS 順位は、 $As'$  からの  $P'_M \cdot P'_S$  ( $As'$  より発震) 起因の 2CS ピーク値 (70 度⑤・160 度②) の CS 順位に劣る。また、野島領域でも、 $P_M \cdot P_S$  起因 (な

し・130度⑥)のCS順位は、 $P'_M \cdot P'_S$ 起因(70度④・150度②)より低い。これは、両者から射出するP波の、実質的な作用距離(範囲)の差と考えられる。すなわち、AsからのP波( $P_M \cdot P_S$ )の射出方向には、一部にため池のない海域がある。他方、As'からのP波( $P'_M \cdot P'_S$ )の射出方向は全て、ため池のある陸域だからと考えられる(Table 5)。

**P波起因のCS順位とS波起因のCS順位：**P波起因のCS順位が、S波起因順位を上回るものがある(Table 5)。5町領域の震央角度では、P波起因の2CSピーク値(160度②： $P'_S$ 、140度③： $P'_S$ )の順位が、S3波起因の10度④( $S'_3$ )より高位にある。野島領域の震央角度でも、P波起因の3CSピーク値(150度②・160度②'： $P'_S$ 、70度④： $P'_M$ )のCS順位は、S1波起因の100度⑤( $S_1 \cdot S'_1$ )より高い。しかし、兵庫県南部地震の強震記録では、P波の加速度振幅は、S波よりかなり小さい(力武, 1996; 香川・他, 1998)。また、P波の放射特性係数は $x_1$ 軸方向のS波の約2割( $v_r/v_s = 0.5$ のとき)、ないし約6割( $v_r/v_s = 0.9$ )である(Fig. 8)。しかるに、P波起因のCSピーク値が、S波起因より上位にあることは、P波以外の地震波の影響が考えられる。

**SV波の関与：**「放射特性に基づく仮説」は、Fig. 8のP波、S波の放射特性(Kasahara, 1982)に基づいている。放射特性はS波のものとしているが、厳密にはSH波のものである(Lay & Wallace, 1995)。S波のもう一つの成分であるSV波の影響を考慮していない。

静止(点)震源の場合、SV波は、P波と同じく、 $x_1-x_3$ 軸平面で $x_1$ 軸に対し、 $\pm 45$ 度および $\pm 135$ 度方向に強く放射される(深尾, 1978)。SV波は剪断波だから、強調されたSV波はこの直交する2つの放射面(鉛直面)を上下に振動しながら進む。

これらの地震波の最大振幅は、P波を1とすると、SV波 $p^3/2$ 、SH波 $p^3$ となる(深尾, 1978)。ここで $p$ は「(S波速度 $\beta$ )/(P波速度 $\alpha$ )」である。 $\alpha$ 、 $\beta$ は、物質 $u$ のポアソン比 $\mu$ によって決まる(国立天文台, 2009)。硬岩の $\mu$ は0.25とされる(地盤工学会, 2007)。このときの $p$ は、1.73となる

(国立天文台, 2009)。したがって、最大振幅は、P波の1に対し、SV波が2.6、SH波が5.2となる。一方、移動震源の場合、Figs. 8b・cから、SH波の放射特性係数は、P波の1.6( $v_r/v_r : 0.5$ )~6.0倍(同0.9)となる。

斜交の被害は、前項までP波に由るとしてきた。しかし、これらの論議により、P波起因の被害に、それに倍するSV波起因の被害が重畳して生じたと考えるべきであろう。

**斜交の被害数：**上述のように、野島領域の震央角度の斜交150度のCSは②位であった。しかし、これはCSがピークを示す単一の角度である。この角度のCS(被害の割合)が周囲(一般的には両隣)の角度より大きいことを示す。しかし、ピークではない周辺の角度にも被害は生じている。ここで、実際の被害数を見る。

震央角度の斜交の理論値は、As系の $P_M \cdot P_S$ が $45^\circ \cdot 135^\circ$ 、As'系の $P'_M \cdot P'_S$ が $65^\circ \cdot 155^\circ$ である。これに対応する震央角度のカテゴリーは、As系の $P_M$ (40・50度)、 $P'_S$ (130・140度)、As'系の $P'_M$ (60・70度)、 $P'_S$ (150・160度)となる(Table 5)。これら8カテゴリーの野島・5町領域の被害数は、58・163個ある。一方、野島・5町領域の全被害数は112・348個(Table 1, Case 1・8)である。斜交の波(SV波およびP波)による被害は、全被害数の51.8・46.8%、つまり両領域とも5割前後占めることになる。このように、P波およびSV波は、AsおよびAs'のずれた位置からそれぞれ、淡路島を斜めに横断するように発震する。そのため、島の東西両縁に至るまで被害を与えた大きな要因と考えられる。

### (5) 野島領域と5町領域の被害の同異

野島・5町両領域の震央距離の最大被害(CS)は、9 kmに生じ、CS曲線の形状も同じであった(3.2.(2)・5.2.(1)項)。しかし、震央角度の最大CSピーク値を示す角度(「CSピーク角度」または「CSピーク値」と単純化している。5.3.(1)項)は、野島領域(10度①)と5町領域(100度①)とは全く異なっていた(3.2.(3)・5.3.(4)項)。同じ地震波を受けながら、両領域の被害の様相は異

なる。この原因について検討する。

**野島・5町領域における震央角度の最大CSピーク値:** 5町領域の震央角度のCSピーク値(角度)100度①の被害は, Asからの $S_1$ (理論値90°)およびAs'からの $S_1'$ (110°)に因る被害が重畳して生じたとした(前項)。この両S1波は野島領域を含む5町領域を縦断する断層走向に一樣に射出される。そのため, 震央距離としては, 野島・5町領域が同型のCS曲線をもたらしたと言える(Fig. 4b)。

一方, 野島領域の震央角度のCSピーク角度10度①は, As'からのS3波つまり $S_3'$ (20°)に由ると考えられる(海域にあるAsからの $S_3$ は被害には無関与: 5.3.(4)項)。As'は, N2x軸上にあると想定された(5.3.(3)項, 前項)。 $S_3'$ は, As'からN2x軸(断層走向方向)直交方向(N2y軸とする)へ射出される。 $S_3'$ による被害はN2y軸周辺に集中する。N2y軸は, 野島領域(震央距離のカテゴリーで3・6・9・12 km)内にあることになる。すなわち,  $S_3'$ による被害は野島領域に集中する。この野島領域内の被害を, 野島領域として捉えるか, 5町領域として捉えるかにより, 被害の割合は大きく変わる。

実際の被害を見る。多変量解析のCSは有用な指標であるが, 異なる解析間のCSを定量的に比較できない。しかし, 理論上, CSと被害率とは相関がある(菅, 1993)。本解析の場合も, 両者はほぼ対応している(Figs. 4b・4d)。したがって, ここでは被害率で論議する。 $S_1$ ,  $S_1'$ が主因と考えられる震央距離9 kmの, 野島・5町領域の被害率(Fig. 4b)は, 30.7・35.2%で, 大きくは変わらない。そして,  $S_1$ ,  $S_1'$ 射出方向の震央角度100度(CSピーク順位: 野島⑤位・5町①位)の被害率も, 34.6・36.1%と, 両領域はほぼ同じ値を示す。つまり, 震央角度100度に被害を生じさせたAs・As'からの $S_1$ ,  $S_1'$ は, 野島領域, 5町領域にわたって一樣な被害をもたらしたことになる。

一方,  $S_3$ (海域に放射される $S_3$ は被害に無関与)が主因と考えられる, 震央角度10度(野島①位, 5町④位)の, 野島・5町領域の被害率は45.5・23.5%であった(Fig. 4d)。野島領域が5町領域

の約2倍となる。また, 野島(Case1)・5町(Case8)領域の平均被害率(28.4・22.3%: Table 1, 項目2)と, 震央角度10度との被害率(45.5・23.5%)とを比べると, 5町領域はほぼ同じ(22.3%と23.5%)だが, 野島領域(28.4%と45.5%)では2倍に近い。野島領域の被害が突出している。この差がCSピーク値の順位として現れていると言える。すなわち平均的な被害(CS順位)の5町領域(7個あるCSピークの内④位: Table 5)と, 最大被害(CSピーク順位①位)の野島領域とのCSに現れていると言えよう。

このように, As・As'からのS1波( $S_1$ ・ $S_1'$ )が, 野島・5町領域を一樣に縦断するのに対し, As'からのS3波( $S_3'$ )は野島領域を局所的に横断する。この違いが, 震央角度のCSピーク角度において, 野島領域と5町領域との差異を生じさせたと言える。すなわち, 野島領域における局所的な被害を, 小領域(野島領域: サンプル数395個)として捉えるか, 大領域(5町領域: 同1562個)として捉えるかの差と言え, サンプルング範囲の差が解析結果に現れたと言えよう。

## (6) 野島領域外の震央角度10度の被害

$S_3$ (As'からのS3波)起因と想定した, 震央角度10度①の被害は, 野島領域のみならず5町領域においても生じている(Table 5)。野島領域は5町領域の一部であるから, 当然とは言える。しかし, 震央角度10度①・0度①'のため池の被害数の内訳は, 野島領域13個(サンプル数27個, 被害率48.1%)に対し, 5町領域では36個(同151個, 23.8%)もある(Fig. 4d)。このことは, 23(=36-13)個, つまり野島領域の約2倍の,  $S_3$ による被害ため池が, 野島領域外の5町領域にあることになる。前項では, 震央角度10度の被害は, 野島領域内にあるAs'から同領域内を横断するように発震するS3波( $S_3'$ )に因るとし, 野島領域特有の局所的なものとした。しかしその被害数は, As'からは離れている「野島領域外の5町領域」の方が多い。このことは, 「野島領域外の5町領域」にも, 被害を生じさせる地震波の発震域がある可能性を示唆する。

震央距離27 kmに、CSはプラス（無被害側、ただし被害率は約15%ある）だが、小さなピークがある（Fig. 4b）。この付近に発震域がある可能性もある。また、発震源として、地中野島断層がさらに続き、As・As'領域の他にN3x軸上にAs''領域の存在の可能性、あるいは、「地震波を震した別の断層がある」という可能性等も挙げられる。野島断層の延長上には、浅野断層（現震央から15 km付近）、一宮撓曲（同25 km付近）、水越撓曲などがある。ただし、Table 3の震源過程の解析結果の10例の中には、第1・第2・第3すべり領域の、いずれの中心（A<sub>1</sub>・A<sub>2</sub>・A<sub>3</sub>）も、各モデル震央から-12km（現震央から-13km, 5.1. (1) 項）超にあるものはない。また、これら断層の走向方向に交差するように志筑断層、育波撓曲等（同15~20km前後）もある。これらについて今後の検討を要する。

#### (7) 淡路島の特殊性と兵庫県南部地震の特性

兵庫県南部地震による淡路島北部のため池堤体の被害は、「放射特性に基づく仮説」（「兵庫県南部地震による淡路島北部のため池堤体の被害は、放射特性によって強調された地震波（地動加速度）によって生じた」とする考え方：5.1. (2)・5.2. (2) 項）によって説明できた。論議の対象は、地震関連のアイテム、つまり震央距離、断層距離、震央角度、断層角度の4アイテムに見られる被害特性である。

この仮説の成立および適用できた理由として、淡路島の地形等の特殊性と、兵庫県南部地震の特性が挙げられる。大前提として、調査・研究対象地域の（野島領域を含む）5町領域に、震源断層である野島断層が存在したことは当然であるが、具体的には次のようなことが挙げられよう。

- (i) 淡路島が北東-南西に細長いこと、
- (ii) 震源断層である野島断層が淡路島の西縁に沿い、北東-南西に延びていること、
- (iii) 野島断層が緩やかなS字型をしていたこと、
- (iv) 震央が淡路島北端付近の海域にあったこと、

(v) As（大すべり）領域の中心をAs≡震央と見なせたこと、

(vi) さまざまな方位の堤軸を持つ多くのため池が、野島領域を含む5町領域の全域に散在していたこと、

等である。それぞれが複合的に関連しており、次のようなことが言える。

(i), (ii), (iii)のため、野島断層を1本の直線（x<sub>1</sub>軸、方位角40°）として近似できた。これが後の1直線モデルの基準線に繋がる。そして、(i)のため、震央角度計測の基準線（堤軸中心Cと震央Eを結ぶ直線）の方位角のばらつきが狭い範囲（26~81:56度）に収まった。その平均値は、野島・5町領域（43.8・44.0度）共に、理論値（40°）に近い（5.3. (7) 項）。

(iv), (v)のため、1直線モデルでは、Asからのx<sub>3</sub>軸方向（海域でありため池はない）の地震波の影響が無視でき、x<sub>1</sub>軸上の被害特性のみを考えればよかった。そのため、震央距離の被害状況（CS曲線）が、放射パターン（x<sub>1</sub>軸（野島断層走向）方向のS波の成分1葉のみで説明できた（5.2. (1) 項）。このことは、その後の、放射パターン（Fig. 8）の適用つまり「放射特性に基づく仮説」の起点となった。そして、その放射パターンから必然的に断層距離の被害状況が予想され、実証できた（Fig. 9, 5.2. (2) 項）。

(ii), (iii)のため、野島断層が1直線（方位角N40°E：1直線モデル）としても、3直線（方位角N50・30・50°E：3直線モデル）としても近似できた。その、3直線モデルの方位角は、1直線モデルの方位角40°の許容差内（40±10°, 5.3. (2) 項）と言える。また、1直線モデルの方位角（40°）は、3直線モデルの方位角（50°と30°）の平均値でもある。これらのことは本論の論議を容易にした。すなわち、まず基本的な被害状況が1直線モデルで説明できた。その後、法線角度の理論値と、多変量解析結果のCSピーク値（角度）との矛盾点から、As領域以外の大すべり（As'）領域の存在が想定され、3直線モデルが設定できた（5.3. (1)~(3) 項）。

(vi)のため、多変量解析のデータとして、複眼

的視点から考察できた。すなわち、小領域である野島領域（サンプル数395個）、および野島領域を包含する大領域の5町領域（1562個）の解析結果の同異点から、被害のメカニズムが推定できたと見える（5.3. (3) ~ (7) 項）。

### (8) 野島領域の断層角度と震央角度

この両角度の関連（相関性）については当初から取り上げてきた（1章, 3.2. (3) 項ほか）。これらの計測の基準は、野島断層（断層角度）および震央（震央角度）である。断層角度の計測の基準線（堤軸中心 C からの野島断層上の最近点 N の法線）の方位角のばらつきは113~147 (35) 度の範囲となった（5.3. (7) 項）。その平均値（132.5度）は理論値（130°）にほぼ一致する。一方、野島領域の震央角度計測の基準線の方位角の範囲は、上述のように26~81 (56) 度であり、平均値の43.8度は理論値（40°）に近い（5.3. (7) 項）。

これら野島領域の、断層角度および震央角度の基準線の平均値は、ほぼ直交（88.7度 = 132.5 - 43.8）関係にある。両角度の理論値（1直線モデル）の基準線（震央角度： $x_1$ 軸：方位角40°，断層角度： $x_1$ 軸の法線：同130°）の交角90°と一致しているとしてよい。震央・断層角度両角度の基準線が直交することは、モデル堤体（Fig. 10）と同様、これらに基づく堤体の震央角度・断層角度の平均値（どちらも約90度：94.3・89.8度：標準偏差48.5・55.1度）も直交関係（両者は90度の差：強い相関，3.2. (3) 項）となる。

しかし、震央角度と断層角度との間に強い相関があると、両角度を用いた本解析はできない。すなわち、本研究の基盤をなすデータ解析は、数量化理論Ⅱ類による多変量解析を用いている（2.3節）。そこでは、変数（アイテム）間に強い連関（≡相関：連関係数 $r_c > 0.5$ ）があると、マルチコ（多重共線性：Multicollinearity）と呼ばれる不具合（解析不能あるいは解析結果に誤り）が生ずるとされる（3.4節）。そのときは、どちらかのアイテム（本解析では、震央角度か断層角度）を外さなければならない。

本解析の場合、両角度間の連関係数 $r_c$ は

0.391 (<0.5) であった（Table 1: Case 1, 項目5, AE&AF）。両角度は連関を示すものの、どちらかの角度を外すほどではないことを意味する（3.4. (1) 項）。このことは、上記、両基準線の平均値間の直交関係（両者には強い相関）と比べると違和感を覚える。

震央角度と断層角度との連関係数 $r_c$ は、個々の堤体 T における両角度の連関（≡相関）を示す値である。個々の堤体 T の震央角度の基準線（T の堤軸中心 C と震央 E を結ぶ直線 CE）と、T の断層角度の基準線（C からの野島断層上の最近点 N の法線 $n_n$ ）とは直交するとは限らない。そこで、野島領域における「個々の堤体 T の両基準線の方位角の差」 $\Delta$ （=「T の断層角度の基準線方位角」-「T の震央角度の基準線方位角」）を求める。

$\Delta$  の平均値 $A_v$ は88.9度で、上記と同じく、理論値（90°）とほぼ一致する。しかし、そのばらつきの範囲は47~121 (75) 度である。上記の震央角度・断層角度それぞれの基準線のばらつきの範囲（56・35度）比べ、19・40度大きい。また、 $\Delta$  の標準偏差 $\sigma$ は12.6度であり、「 $A_v \pm \sigma$ 」内のサンプル数は全体の61.0%（241個）である。これは、野島領域における、震央角度・断層角度の、67.8%（268個）・91.4%（361個）を（5.3. (7) 項）、6.8ないし31.4ポイント下回り、正規分布の68.3%より7.3ポイント低い。

すなわち、 $\Delta$ は震央・断層角度それぞれの基準線に比べ大きくばらつくこととなる。これは、一般的にはマイナス要因である。しかし、本解析の場合、このばらつきのために両角度間の連関（相関）が減少し、結果的に両角度とも、変数としての独立性が保たれたことになる（3.4節）。このため野島領域においては、震央角度・断層角度を独立変数として同時に用いた解析が可能になった。

この意義は大きい。このことにより、算定結果の両角度のCSピーク値を同一視点から論議することができた。すなわち、震央角度、断層角度について、直交ペア（5.3. (1)・(2) 項）等の仮説が成立し、As'系の存在（5.3. (3) 項）等その後の論議が可能になった。これらのことは、両基準線の選定の故もあるが、すべて、(i) ~ (vi) の淡路島

の特殊性・地震特性に因る。まさに稀有で、絶妙な解析環境を与えられていたことに留意したい。

## 7. おわりに

1995年兵庫県南部地震により被害を受けた「ため池」(厳密には「ため池堤体」と、無被害のため池を比較し、両者を分けた要因およびそのメカニズムを知ろうとした。対象は、野島(断層)領域(野島断層の両端で直交方向に淡路島を切り出した領域)の395(被害112,無被害283)個,および、野島領域を包含する、淡路島北部の5町領域(現淡路市)の、1562(同348,1214)個である。要因として最大11アイテム・93カテゴリーを設定し、多変量解析(数量化理論Ⅱ類:量的変数はカテゴリー化)を行い、それらの被害への寄与を求めた。そして、その結果を兵庫県南部地震および地震学に関する諸文献に基づき定性的に検討した。主な知見を纏めると次のようになる。

1. 野島領域で被害に関わる、地震関連のアイテムは、震央角度(堤軸中心Cと震央Eとを結ぶ直線CE)と「Cでの法線 $n_c$ 」との交角)、断層距離(Cから野島断層最近点Nまでの距離CN)、断層角度( $n_c$ とNでの法線 $n_n$ との交角)、震央距離(直線CEの長さ)の順であった。

2. 震央距離のカテゴリースコア(CS:被害の指標)は、両領域ともに震央から離れるほど大きくなり、9km(「実距離平均」10.5km,以下「」内略)で最大に達した後、減少に転ずる。

3. 断層距離(野島領域のみ)も、断層から内陸側へ500m(750m)にCSピークが1つあった。

4. 震央角度および断層角度のCSは一見ノイズ状であったが、震央角度のCSピークは6個、断層角度(野島領域のみ)は7個あった。震央角度の最大CSピーク値(角度)は、野島領域(10度)と5町領域(100度)とは異なる。断層角度の最大CSピーク値(角度)は100度であった。CSピーク角度はこれらの直交および斜交にもあった。いずれも単なるノイズとは考えられない。

5. これら地震アイテムの被害状況を、移動震源の放射特性(パターン)に基づいて定性的な解釈を試みた(「放射特性に基づく仮説」:これら一

見特異な被害は放射特性によって強調された地震波により生じた)。その放射パターンは断層進行方向 $x_1$ 軸上で最大動径を持つ紡錘型を示す。 $x_1$ 軸に直交する幅(影響幅)は、原点から離れる程、ある程度までは大きくなる。

6. 野島断層を $x_1$ 軸で近似し、その原点を大すべりの中心As(≒震央)とした(1直線モデル)。震央距離が増す(Asから離れる)と、影響幅に比例してその範囲内にあるため池数が増える。エネルギーがある程度以上あれば、結果的に被害ため池は増える。一方で距離減衰により、ある距離を超えると影響幅が増えても被害数は減少し始める。この逆転位置が、震央距離9km(2項)と考えることができる。

7. S波の放射パターンは $x_1$ 軸を挟んで両側にもある。ところが断層距離のCSピークは1つであった(3項)。そこで断層距離のカテゴリーを細分化して再解析した。その結果CSピークは、極小値の位置250(実距離375≒400)mを挟んで-150(同-75)mと500(同625)mの2つできた。放射パターンの傾向と一致する。

8. Asから、「放射特性により強調された」(以下、「」略)S波が、 $x_1$ 軸方向(S1波)、同直交方向(S3波)、P波が斜交方向(山側・海側:両波は直交)へ射出される。これらの被害を最も受けやすい(モデル)堤体の堤軸はS波同士、P波同士の2角度ずつは直交関係にある。これを「理論値の直交ペア」とした。震央角度、断層角度ともに2組(計4角度)ずつできる。

9. 上記に対し、4項の「CSピーク値(角度)の直交ペア」(許容差10度)は、震央角度、断層角度ともに3組(6角度)ないし4組(8角度:準ピークを含む)成立した。理論値の直交ペア(2組)より多い。

10. 堤軸法線の方位角のCSピーク値は、野島領域・5町領域とも30度と50度にある。その直交方向の110(=30+90-10)度、130(=50+90-10)度にもCSピークがある。

11. 野島断層の形状は緩やかなS字型をしている。これを3本の直線で近似し、これに平行にN1x・N2x・N3x軸を設定した。その方位角は



50・30・50度である。前項と一致する。

12. 9～11項から、放射パターンに従う20度ずつの2つの直交系があることが想定された。発震源(すべり領域の中心)を海域のAs(≡震央)とするAs系に対し、N2x軸上にあることになるAs'を発震源とするAs'系である(3直線モデル)。

13. 斜交の被害はP波に由る(8項)としたが、S波の被害を上回るものがある。この被害は、P波と同一方向に射出される、SV波に由る被害が重畳したものと考えられた。

14. 震央角度の最大CSピーク角度は、野島領域(10度①位)と5町領域(100度①位)とは異なる(4項)。震央角度10度の被害は、S3波(As・Asからの $S_3 \cdot S'_3$ )起因となる。 $S_3$ は射出方向が海域で無関与となる。 $S'_3$ は、N2x軸上にあることになるAs'からN2x軸直交方向(野島領域内)へ射出される。被害は野島領域に集中する。これを5町領域(1562個)として見るか、野島領域(395個)として見るかにより、CS順位に差が現れたと言える。

15. このように、一見奇異に見えた地震関連のアイテム(震央距離・断層距離、震央角度・断層角度)の被害状況が「放射特性に基づく仮説」によって説明できた。この仮説の成立および適用できた理由として、淡路島の地形等の特殊性(淡路島が北東-南西に細長)と、兵庫県南部地震の特性(野島断層が淡路島の西縁に沿った緩やかなS字型、震央(≡As)が淡路島北端付近の海域等)が挙げられる。

16. 非地震関連のアイテムの被害は、堤体量(=堤高×堤長)が大きいものほど多い傾向を示し、地盤標高は50 m未満か200 m前後のものが多く、表層地質は、野島領域では砂岩系・花崗岩系、5町領域では粘性土系・砂質土系の被害が多い。ここでも地質分布を見る視点が局所的か広域かの差が現れる。

17. 解析結果の精度を確認する指標として、確率的判別の中率を基準にする手法、ジャックナイフ法に準じた手法(サンプルを無作為に1～4割削除、それぞれを10回計算しその平均値を求めた)を提案し、解析結果の信頼性を確かめた。前者に

より、全体的な解析精度が、後者により断層距離の特異な被害状況が確認できた。

18. 多変量解析の一つである数量化理論Ⅱ類は、本研究のように量的および質的な要因が混在するとき、その被害への寄与を知るには有効な手法であった。そして、(理論的には直交する)震央角度と断層角度を、それぞれの独立性を保ちつつ、同時に用いて多変量解析ができた。そのため、同一視点から被害のメカニズムが検討できた。このことの意義は大きい。これは本研究の自然環境条件の特異性(15項)に負う。また野島・5町領域の結果を比較したことにより、複眼的な視点から、被害のメカニズムの検討ができたと言えよう。今後、ため池に限らず、さらなる事例の収集と理論的な検討が望まれる。

最後に、本研究は、6434名の方々の尊い命が喪われた、兵庫県南部地震に由る。当時の激しい衝撃と、深い悲しみの中で、筆者にできること何か、ということでこの調査・研究が始まった。改めて犠牲になられた方々のご冥福を心からお祈り申し上げます。

## 謝辞

本研究にあたり、震災直後の混乱の中、資料の供与等の便宜をお図り頂いた兵庫県、旧北淡町他4(淡路・一宮・東浦・津名)町の関係各位、データの取得・整理・取り纏めに協力してくれた国政華奈、坪内伸治、沼田(渡邊)知子、森永(戸田)智子さん、現地調査に協力してくれた島田清助教授(現東京農工大名誉教授)、西山竜朗助手(現岐阜大学准教授)、研究室スタッフが次々と長期海外出張で不在となる中、率先して現地調査を支えてくれた堀俊男君、他、Chen Chin Tai、朴元浩、榎原高範、水野智仁、渡辺徹、林(榎原)美緒、浅野敬一、横溝(高橋)隆之君はじめ、平成7～10年度の岡山大学農学部農業造構学研究室関係各位および大学院在籍生諸君、模式図等作製に御協力頂いた元岡山県土地改良事業団体連合会技師、岩浅欣生氏に謝意を表す。また、御多忙な中を、地震学に対する御助言を賜った、京都大学防災研究所教授岩田知孝先生、同教授で編集委員

の澁谷拓郎先生、東北大学大学院教授源栄正人先生、および多変量解析を含む統計解析に懇切な御助言を賜った岡山大学大学院教授（現名誉教授）垂水共之先生、同 田中豊先生他各位、御懇篤なる御意見を賜った閲読委員、さらに論文全体ならびに地震学的観点から鋭いご指摘と数々の貴重なご助言を賜った編集委員に心から深甚の謝意を表します。

最後に、本研究の当初からモチベーションを与え、明確なるご意見、お励ましを賜った、お二人のご恩師、アメリカ合衆国インディアナ州立Purdue 大学名誉教授（故）A. G. Altschaeffl 先生、京都大学元総長（故）沢田敏男先生に心から御礼申し上げます。

### 参考文献

- Aki, K and Richards, P.G: Quantitative Seismology, 2nd ed, University Science Books, 2002 (上西孝司・亀 伸樹・青地秀雄訳：地震学－定量的アプローチ, 古今書院, pp.100-108, 669-678, 2004).
- 青木慎也：格子上の場の理論, シュプリンガーフェアラーク東京, pp.217-222, 2005.
- 有馬 哲・石村貞夫：多変量解析のはなし, 東京図書, pp. 211-242, 1989.
- 地質調査所：明石地域の地質, 1992a.
- 地質調査所：洲本地域の地質, 1992b.
- 地質調査所：淡路島北部地質図, 日本地図センター, 1996.
- 土質工学会：土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp. 179-200, 1990.
- 藤井弘章, 渡辺 忠：貫入抵抗による締固め効果の判定－フィルダムの締固めに関する実験的研究 (II), 農業土木学会論文集, No.41, p56-61, 1972.
- 藤井弘章：密度以外の方法による現場締固め評価, 粗粒材料の締固め, pp.242-254, 土質工学会, 1990
- 藤井弘章：堆積軟岩を使用したフィルダムの現況, 堆積軟岩による盛土の工学的諸問題に関するシンポジウム論文集, pp.291-296, 地盤工学会, 1995.
- 藤井弘章・島田 清・西村伸一：兵庫県南部地震によるため池被害－特に北淡町を中心に, 兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証, 科研研究成果報告書 (代表：藤原禎三), pp. 3-208-223, 1996.
- 藤井弘章・西村伸一・島田 清・難波明代・国政華菜：兵庫県南部地震による淡路島のため池被害の要因分析, 農業土木構造物の耐震信頼設計に関する研究, 科研研究成果報告書 (代表：藤井弘章), pp.1-61, 1997a.
- 藤井弘章・国政華菜・難波明代・西村伸一：兵庫県南部地震による淡路島のため池被害の要因分析, 地震工学研究会講演論文集, 2, pp. 1141-1144, 1997b.
- 藤井弘章・国政華菜・難波明代・西村伸一：兵庫県南部地震によるため池被害の要因分析－北部4町の事例, 都市直下型地震シンポジウム論文集, pp. 231-234, 1998a.
- 藤井弘章・難波明代・横溝隆之・西村伸一・島田 清・西山竜朗・堀 俊男・坪内伸治：兵庫県南部地震によるため池被害の要因分析－土性を中心に, 第17回日本自然災害学会講演会講演概要集 (以下自然災害学会講演概要集と記す), 1998b.
- 藤井弘章・難波明代・西村伸一・島田 清・西山竜朗：兵庫県南部地震による淡路島北部5町のため池被害の要因分析, 第18回自然災害学会講演概要集, 1999a.
- 藤井弘章・西村伸一・島田 清・西山竜朗：兵庫県南部地震による淡路島北部5町のため池被害と断層, 都市直下型地震シンポジウム論文集, pp.491-494, 1999b.
- Fujii, H., K. Kunimasa, A. Namba, T. Yokomizo, S. Nishimura, K. Shimada, T. Hori and T. Nishiyama: Damage factors for small embankment dams due to the Hyogoken-Nambu earthquake - Case study on Hokudan town, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 6, pp.117-131, 2000a.
- 藤井弘章・西村伸一・有本慎一：兵庫県南部地震によるため池堤体の構造と被害に関する分析－北淡町の場合, 第35回地盤工学研究発表会講演集, 2000b.
- 藤井弘章・国政華菜・難波明代・横溝隆之・西村伸一・島田 清・堀 俊男・西山竜朗・脇谷芳招：兵庫県南部地震による北淡町を中心にしたため池の被害の要因分析, 岡山大学環境理工学部研究報告, Vol.7, No.1, pp.55-74, 2002.
- 藤井弘章・西村伸一・島田 清：土性を考慮した兵庫県南部地震によるため池の被害・要因分析, 第23回自然災害学会講演概要集, 2004a.
- 藤井弘章・西村伸一・島田 清：兵庫県南部地震に

- よる被害・無被害ため池への土性の影響, H16 農業土木学会大会講演概要集, 2004b.
- 藤井弘章・難波明代・西村伸一・島田 清・西山竜朗: 兵庫県南部地震による淡路島北部5町のため池被害・無被害要因の多変量解析, 自然災害科学, Vol.24, No.1, pp.59-78, 2005.
- 藤井弘章: 2007年能登半島北部および1995年淡路島北部のため池被害の比較, 第27回自然災害学会講演概要集, 2008.
- 藤井弘章・茂野 忠・関川 力: 2004年新潟県長岡周辺地域と1995年兵庫県淡路島北部のため池被害の比較, 第28回自然災害学会講演概要集, 2009.
- 藤井弘章・茂野 忠・関川 力: 1995年兵庫県淡路島北部および2004年新潟県長岡周辺地域の地震によるため池堤体の被害, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.760-767, 2010.
- 藤井弘章: 兵庫県南部地震による淡路島北部のため池堤体被害の多変量解析結果に対する放射パターンに基づく解釈の試み, 第30回自然災害学会講演概要集, 2011.
- 藤井弘章・横溝隆之・難波明代・堀 俊男・西村伸一・島田 清・西山竜朗: 1995年兵庫県南部地震による淡路島北部の被害・無被害ため池堤体の土質特性, 農業農村工学会論文集, Vol.82, No.1, pp.1-17, 2014.
- 藤井弘章: 1995年兵庫県南部地震による淡路島北部のため池堤体被害の多変量解析結果に対する定性的な地震学的解釈の試み, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1542-1551, 2015
- 藤井弘章: 震災被害・無被害堤体土の砂・細粒分のみの(FS)分類による差別化-兵庫県南部地震による淡路島北部ため池を中心に, 第51回地盤工学会研究発表会講演集, 2016.
- 藤井弘章: 1995年兵庫県南部地震と2016年熊本地震によるため池被害の比較, 第37回自然災害学会講演概要集, 2018.
- 深尾良夫: 古典地震学, 地震の物理(金森博雄編), 岩波講座 地球の科学, pp. 64-67, 岩波書店, 1978.
- 古川澄夫・伊藤秀美: 1995年兵庫県南部地震の概要, 月刊地球/号外, pp. 30-38, 1995.
- 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告共通編-2, 日本地震学会・地盤工学会・土木学会・日本建築学会・日本機械学会, pp. 22, 1998.
- 橋本 学: 測地データに基づく震源過程, 阪神・淡路大震災調査報告共通編-2(同編集委員会), 日本地震学会・他, pp.123-139, 1998.
- 発電水力協会: 最新フィルダム工学, 発電水力協会, pp.1-633, 1972.
- 北淡町: 土地台帳, 1891.
- Hirasawa, T. and W. Stauder: On the seismic body waves from a finite moving source, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 55. pp. 237-262, 1965.
- Horikawa, H., K. Hirahara, Y. Umeda, M. Hashimoto and F. Kusano: Simultaneous inversion of geodetic and strong motion data for the source process of the Hyogo-ken Nanbe, Japan, earthquake, J. Phys. Earth, Vol.44, pp. 455-471, 1996.
- 兵庫県: 被害ため池台帳, 1995a.
- 兵庫県: 被害ため池台帳位置図, 1995b.
- 兵庫県: ため池台帳(ため池調査票), 1977a.
- 兵庫県: ため池台帳(ため池調査票)位置図, 1977b.
- 兵庫県農林水産部農地整備課: 兵庫県南部地震農地農業用施設震災記録誌, 1996.
- Ide, S., M. Takeo and Y. Yoshida: Source process of the 1995 Kobe earthquake: Determination of Spatio-temporal slip distribution by Bayesian modeling, Bull. Seismo. Soc. Am., Vol. 86, pp. 547-566, 1996.
- 石村貞夫: 統計解析のはなし, 東京図書, pp. 44-55, 1992.
- 石村貞夫: すぐわかる統計解析, 東京図書, pp. 34-35, 2006.
- 岩崎 学・中西寛子・時岡規夫: 実用統計用語事典, オーム社, pp. 114, 2004.
- 地盤工学会: 設計用地盤定数の決め方-岩盤編, 地盤工学会, pp.142-144, 2007.
- 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 地盤工学会, pp. 51-80, 2009.
- 香川敬生・盛川 仁・澤田純男: 代表的な観測例, 阪神・淡路大震災調査報告共通編-2, 同編集委員会, 日本地震学会・他4学会, pp. 187-205, 1998.
- 釜江克宏: 高周波地震動の発生メカニズム, 阪神・淡路大震災調査報告共通編-2, 同編集委員会, 日本地震学会・他4学会, pp.156-167, 1998.
- 釜江克宏: 地震動評価の高度化, 地盤震動-現象と理論, pp.322-336, 日本建築学会, 2005.
- 菅 民郎: 多変量解析の実践 下巻, 現代数学社, pp. 43-116, 1993.
- 菅 民郎: らくらく図解統計分析教室, オーム社,

- pp. 238-253, 2006.
- Kasahara, K.: *Earthquake mechanics*, Cambridge University Press, 1982 (笠原慶一著訳：地震の力学－近代地震学入門，鹿島出版会，pp.82-97, 1983).
- 活断層研究会編：新編日本の活断層－分布図と資料，東京大学出版会，pp. 280-297, 1991.
- 菊地正幸：遠地実体波による震源のメカニズム，月刊地球 / 号外，pp. 47-53, 1995.
- 菊地正幸：兵庫県南部地震のメカニズム，地震の力学，パリティ編集委員会編（力武常次責任編集），丸善，pp. 59-71, 1996
- 菊地正幸：遠地実体波記録に基づく震源過程，阪神・淡路大震災調査報告共通編-2，同編集委員会，日本地震学会・他4学会，pp. 140-148, 1998.
- 木下栄蔵：多変量解析入門，啓学出版，pp. 75-88, 1992.
- 気象庁：災害時地震・津波速報平成7年（1995年）兵庫県南部地震，1995
- 気象庁：平成7年（1995年）兵庫県南部地震調査報告－災害時自然現象報告書，気象庁技術報告，No.119, 1997.
- 国土地理院：日本の市区町村位置情報要覧（平成六年度版），1994.
- 国土地理院：空中写真（淡路島北部，95.1.18撮影），日本地図センター，1995.
- 国土地理院：1:25,000沿岸海域土地条件図 明石，1996a.
- 国土地理院：1:25,000都市圏活断層図，IX近畿圏西部地区，1996b.
- 国土地理院：成果表，1997.
- 国土地理院：世界測地系への移行の概要，<http://vidb.gsi.go.jp//LAW/G2000/g2000.html>，2002.01.07.
- 国土地理院：測量計算，便利なプログラムデータ，<http://vidb.gsi.go.jp//sokuchi/program.html>，2007.9.11.
- 国立天文台：平成16年理科年表，丸善，pp. 337, 745, 2003.
- 国立天文台：平成22年理科年表，丸善，pp. 701, 736, 2009.
- 小西貞則・越智義道・大森裕浩：計算統計学の方法，朝倉書店，pp. 5-59, 2008.
- 額額一起：震源過程の全体像，阪神・淡路大震災調査報告共通編-2，同編集委員会，日本地震学会・他，pp. 168-175, 1998.
- 古谷野亘：多変量解析ガイド，川島書店，pp. 114-118, 1988.
- 工藤一嘉：地震動評価の現状と予測精度，地盤震動－現象と理論，日本建築学会，pp. 309-322, 2005.
- Lay, T. and T.C. Wallace: *Modern Global Seismology*, Academic Press, 1995 (柳谷 俊訳：地震学，古今書院，pp. 447-524, 2002).
- 松原 望：入門統計解析－医学・自然科学編，東京図書，pp. 333-338, 2007.
- 松浦光宏：地震発生の物理，地震の科学，パリティ編集委員会（力武常次責任編集），pp. 72-82, 丸善，1996
- 源栄正人：弾性波動場の基礎理論と食い違い断層震源による点震源解，地盤震動－現象と理論，pp. 68-84, 日本建築学会，2005.
- 農林水産省構造改善局：土地改良計画設計基準，設計ダム，農業土木学会，pp. 1-555, 1981.
- 大中康誉・松浦光宏：地震発生の物理学，東京大学出版会，pp. 43-57, 2002.
- 力武常次：地震学入門，地震の科学，パリティ編集委員会（力武常次責任編集），pp.1-4, 丸善，1996
- 理論地震動研究会：地震動－その合成と波形処理。鹿島出版会，pp. 55-65, 1997.
- 坂田 勝：振動と波動の工学，共立出版，pp. 1-5, 1979.
- Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Takehi and M. Hoshiba: Minute locating of fault planes and source process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, earthquake from the waveform inversion of strong ground motion, *J. Phys. Earth*, Vol.44, pp. 473-487, 1996.
- Sekiguchi, H., K. Irikura and T. Iwata: Detailed source process of the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe) earthquake using near-field strong ground motion data, *Proc.10<sup>th</sup> Japan Earthq. Eng. Symp.* Vol.1, pp.67-72, 1998.
- 鈴木義一郎：現代統計学小事典，講談社，pp. 27-28, 1998.
- 武尾 実：強震動記録に基づく震源過程，阪神・淡路大震災調査報告共通編-2，同編集委員会，日本地震学会・他，pp. 149-155, 1998.
- 田中 豊・垂水共之：統計解析ハンドブック－多変量解析，共立出版，pp. 57-87, 160-169, 1997.
- 田中 豊・脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，pp. 151-160, 1983.
- 垂水共之：新版SPSSx解析編2，東洋新報社，pp.

- 262-273, 1995.
- 内田和子：1995年兵庫県南部地震によるため池の被災と貯水率との関連，地学雑誌，Vol.105, No.5, pp.649-658, 1996.
- 上田太一郎・荻田正雄・本田和恵：Excel 徹底活用多変量解析，秀和システム，pp.234-276, 2003.
- USBR (United States Bureau of Reclamation): Design of small dam, US Government Printing Office, 1960 (日本大ダム会議訳，ダムの計画と設計，pp. 1-189, 1966)
- 山田雅行・平井利之・岩下友也・釜江克宏・入倉孝次郎：兵庫県南部地震の震源モデルの再検討，日本地震学会講演予稿集，秋期大会，A14, 1999.
- Yang, M., C. K. and D.H. Robinson: Understanding and learning statistics by computer, World Scientific, Publication Co Pte Ltd, 1986 (永井武昭・後藤昌司・土屋佳英・浦狩保明・渡辺秀章・江藤俊寿 訳：計算機統計学入門，MPC, pp. 156-178, 1994).
- 吉田耕作：直観的統計学，日経BP社，pp. 311-316, 2006.
- Yoshida, S., K. Kotetsu, B. Shibazaki, T. Sagiya, T. Kato and Y. Yoshida: Joint inversion of near-and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, J. Phys. Earth, Vol.44, pp. 437-454, 1996.
- Wald, D. J.: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, J. Phys. Earth, Vol.44, pp. 489-503, 1996.
- (投稿受理：平成17年12月20日  
訂正稿受理：令和2年4月28日)

## 要 旨

本研究では、淡路島北部のため池の、地震被害・無被害を分けた要因とメカニズムを明らかにしようと試みた。多変量解析(10ないし11アイテム)を、野島領域395(被害:112, 無被害:283)個, 5町領域1562(同じく348, 1214)個について行った。主なアイテムのカテゴリースコア(CS)のピークは、震央角度が6個(野島領域:CSの大きさ順に, 10, 150, 30, 70, 100, 130度。5町領域:同じく, 100, 160, 140, 70, 40, 10度), 断層角度が7個(野島:同じく, 100, 80, 20, 160, 40, 140, 120度), 震央距離が1個(野島・5町領域共10 km), 断層距離2個(野島:-150, 600 m)あった。これらの結果は放射パターンから説明できた。CSのピーク角度と強調された地震波の放射角(理論値:P波・SV波:45度と135度, SH波:0度と90度)との関係から、震央付近の第1の強震点  $A_s$  と共に、第2の強震点  $A_s'$  があると言えた。