

論文

# 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

藤井 弘章\*・難波 明代\*\*・西村 伸一\*\*\*・島田 清\*\*\*\*・西山 竜朗\*\*\*

## Multivariate analysis for damage factors of small embankment dams on five towns of northern Awaji Island due to the Hyogoken-Nambu earthquake

Hiroaki FUJII\*, Akiyo NAMBA\*\*, Shin-ichi NISHIMURA\*\*\*, Kiyoshi SHIMADA\*\*\*\* and Tatsuro NISHIYAMA\*\*\*\*

### Abstract

This study was performed to clarify which factors affected damage to tame-ike (small embankment dams for irrigation in Japanese) of northern Awaji Island in western Japan due to Hyogoken-Nambu earthquake. Multivariate and ordinary statistical analyses were carried out for 1788 dams (350 damaged and 1438 undamaged dams which identified using various documents). The model for analysis was created with 11 items and 136 or 100 categories for 4 groups (Location, Geology, Structure, and History of Dam). As a result of analysis, the factors causing to damage for dam in order are (1) distance to the epicenter (9 to 15 km, which almost agree to the location of seismic intensity 7 JMA), (2) nearest fault (Nojima, Mizukoshi and D2), (3) embankment volume (the larger the more), (4) angle of crest axis to epicenter (normal or vertical), (5) angle of crest axis to nearest fault (normal or vertical), especially reservoir located backward dam, (6) distance to the nearest fault (less than 750 m), (7) elevation of dam site, (8) plan view of dam axis (complicate), (9) surface geology of dam site (soil foundation), (10) leakage, (11) repair. Analysis in this way might be possible to notice the distribution of intensity of seismic force and prediction for damage of embankment.

キーワード：兵庫県南部地震，ため池堤体，数量化理論Ⅱ類，被害無被害要因，被害予測

Key words : Hyogoken-Nambu earthquake, embankment dam, quantification theory type II, factors of damaged and undamaged, prediction damage

\* 岡山県土地改良事業団体連合会（岡山大学名誉教授）  
Professor Eremites of Okayama University  
\*\* 現岡山県  
Okayama Prefecture

\*\*\* 岡山大学大学院  
Graduate School of Okayama University  
\*\*\*\* 東京農工大学  
University of Tokyo Agriculture and Technology

## 1. はじめに

兵庫県南部地震(1995.1.17, マグニチュード:  $M=7.2$ )により, 多くのため池が被害を受けた。他方, 無被害のものも多い。ため池(堤体)は, 規模は小さいが英文表記では Embankment dam であり, フィル(盛土した)ダムに属する。灌漑水源としても重要な土構造物で, 型式はアースダムである。この被害・無被害をわける要因を知ることが, 単にため池堤体だけでなく, 他の盛土構造物に対しても意義があると考え。筆者は, これを探ろうとして淡路島のため池を対象に, 統計的, 地盤工学的な研究を続けている(藤井ら, 1996, 1997a, 1997b, 1998a, 1998b, 1999a, 1999b, 2000a; Fujii et al., 2000b, 2002, 2003, 2004a, 2004b)。淡路島には1市10町があるが, 中でも震源に近い北部地区の被害が大きかった。本論では, 淡路島北部5町(淡路・東浦・北淡・一宮・津名町)の文書資料を用いておこなった多変量解析結果を中心に述べる。

兵庫県南部地震によるアースダム・ため池の被害の報告がいくつかある(Hasegawa et al., 1996; Tani et al., 1996; Matsumoto et al., 1996; 高知大学, 1996; 兵庫県, 1996; 辻, 1997)。

被害・無被害を対比した研究例は過去にもあり, 池見(1993)は優れたレビューをおこなっている。これらは, いずれも慣用的な統計分析, つまり被害・無被害という目的変数に対し, 説明変数が単変量の統計分析(以後「単変量解析」あるいは「一般的な統計」としてよぶこととする)が用いられている。すなわち, 秋葉・仙波(1941)は1939年の男鹿地震( $M=6.8$ ) (東京天文台, 1998)時の58個の被害ため池と12個の無被害ため池について先駆的な調査をし, 土性・地質学特性を論じている。また高瀬ら(1966)は, 1965年の新潟地震( $M=7.5$ ) (東京天文台, 1998)時に971個のため池の内123個の被害ため池について, 地質・ため池の構造・震度等について論じた。守谷ら(1968a, 1968b)も同様な研究をおこなっている。谷・長谷川(1987, 1991)は, 1968年の十勝沖地震( $M=7.9$ ) (東京天文台, 1998)時の1208個のため池の内202個の被害ため池について, ま

た1983年の日本海中部地震( $M=7.7$ ) (東京天文台, 1998)の1834個のため池の内218個の被害ため池について調査しており, 地質・ため池の構造・土性について論じている。

地震災害に対する多変量統計解析(以後「多変量解析」と表記する)は, 土木構造物に対しては幾つかある(市原ら, 1981, 1983; 久保, 1990; 岡田ら, 1990; 山田, 1992)。ため池についても, 日本海中部地震時のデータを用いて(無被害: 952個, 被害: 177個)多変量解析がなされている(山崎ら, 1989; 鈴木ら, 1992; 池見, 1993)。しかし著者ら自身も触れているように, その結果には納得し難い部分が多々ある。

上記の地震は, いずれもプレート境界型あるいは遠地型地震であり, 兵庫県南部地震のように活断層が大きく関わっているような直下型あるいは局地型の地震ではない。したがって当然, 従来の研究では活断層が要因として取り上げられることはなかった。これについて, 藤井(Fujii et al., 2000b; 藤井ら, 2002)は, 活断層に関する項目をも要因として取り上げ, 淡路島の北淡町のため池509個(被害181個, 無被害328個)について, 数量化理論Ⅱ類による分析を行ない, いくつかの知見(5.3項, 5.5項参照)を得ている。ただし, データ数が限られていること, 北淡町が野島断層を含む特殊な小領域であること等から, その普遍性に疑問が残った。

本論では, 北淡町領域での解析での問題点を踏まえ, 広領域の淡路島北部5町(以後原則として「5町領域」と呼ぶ)の1788個のため池を同定し, 文書データを用いて, 被害の要因及びそれらの被害への寄与について総合的に探ろうとする。

## 2. 研究方法

### 2.1 被害・無被害ため池の資料の収集と同定

資料収集は文書資料と現地調査からなる。分析対象として, 「被害ため池台帳・同位置図」(兵庫県, 1995a; 北淡町, 1995a; 兵庫県, 1995b; 北淡町, 1995b)記載の425個, 「ため池台帳・同位置図」(兵庫県, 1977a, 1997b)記載の2041個のため池を照合した。さらに必要に応じて「地震

直後の空中写真」(国土地理院, 1995), 「1/2.5 万地形図」を用いて確認した。その結果, 1788 個(被害 350 個, 無被害 1438 個)を同定できた。これらの被害及び無被害ため池を Fig. 1 に示す。

また, 文書データの約 5%の被害・無被害ため池をほぼ同数選んで現地調査をし, 簡単な測量(堤高・堤長・斜面勾配等)と土質調査(比重・粒度・コンシステンシー・貫入抵抗等)を行なった。

なお本論において「被害ため池」とは, 堤体が被害を受けたものであり, 洪水吐とか放水路とかの付属構造物の被害は含んでいない。堤体の崩壊, 滑動, クラック等, 被害には大小の差異があるが, これらを一括して被害ため池としている。

## 2.2 被害要因の選定

### (1) 一般的な被害要因

被害に関わる要因には誘因(外因)と素因(内因)がある。外因は, いうまでもなく各ため池位置の地震加速度である。地震直後, 震度が同定され淡路島の震度 7 の分布図(気象庁, 1997)が作成されているが, 個々のため池の震度を定量的に把握することは不可能であった。したがって, 本研究における要因とは素因を意味する。

素因として, フィルダムの設計に考慮すべき事項(例えば USBR, 1960; 電力土木技術協会, 1981)を参考に, 予備解析(Fujii et al., 1997a)を経て, 13 項目を選んだ。これらは(項目の定義等: 次項参照), (1)ため池の位置(①最近断層・②最近断層距離・③震央距離・④ダムサイトの標

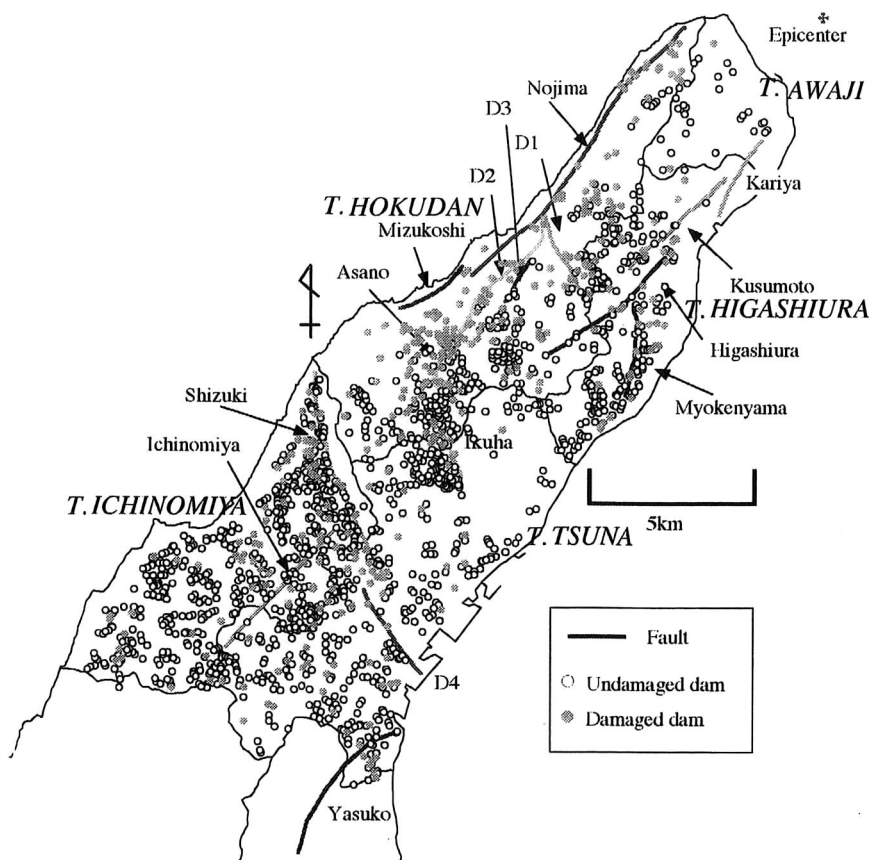


Fig. 1 Distribution of damaged and undamaged dams, and active faults on northern Awaji Island

高), (2) ダムサイトの地質特性 (⑤ダムサイトの表層地質), (3) ため池の構造 (⑥堤体量・⑦震央角度・⑧最近断層角度・⑨堤軸の平面形状・⑩連続池), (4) 堤体の土質特性, (5) ため池の履歴 (⑪築堤年代・⑫改修履歴・⑬地震前の漏水状況) の5つのグループに分類される。

これらのうち、「(4) 堤体の土質特性」の文書資料は得られなかった。そこで前述のような手法で土質工学的特性を調べた。堤体の土質特性は、被害・無被害に対して大きな因果関係があるが(藤井ら, 1998b, 2003, 2004a), 100個所に満たないデータであるので, 本論の多変量解析には用いていない。北淡町の解析では上記の①~⑬までの項目を用いたが(Fujii et al., 2000b)が, 5町領域では精度と重要度を勘案して, ⑩連続池と⑪築堤年代を割愛した。

なお以後特に断らない限り素因を単に「(被害に関わる) 要因」と呼ぶ。また多変量解析で用いられる「アイテム」(「カテゴリー」も含め)も「要因」と同義である。例えば, 「ダムサイトの表層地質」が「花崗岩」のとき, 前者がアイテムであり, 後者はその一つのカテゴリーである。

本論では, 上記の11アイテム, および136ないし100カテゴリー(Fig. 6参照)を定めた。このようなアイテムおよびカテゴリーの選定の妥当性については, 4.1項で論ずる。

## (2) 分析の対象とした項目(アイテムとカテゴリー)および同定した個数

主なアイテム, カテゴリーの定義等は下記のとおりである。

1) 最近断層: あるため池から最も近い断層のことである。5町領域および周辺には, Fig. 1に見られるように, 9つの断層(野島, 東浦, 育波, 志筑, 浅野, 楠本, 妙見山, 安乎, 仮屋), 2つの撓曲(水越, 一宮)と4つの無名の断層(本論では, D1, D2, D3, D4と呼称する)の15個がある(日本活断層研究会: 1991, 地質調査所: 1997)。以後「断層」という場合は撓曲も含める。

2) 最近断層距離・震央距離・震央角度・最近断層角度: 同定された1788個のため池について基準座標を求め(国土地理院, 1977), Fig. 2を

参考に, 以下に示す手法でこれらの値を算定した。

震央距離( $d_E$ ): 震央E( $x_E, y_E$ )と堤軸の中心C( $x_C, y_C$ )との距離CE。ため池堤体が2軸以上(6)項参照)有すときは, 最も長い軸を用いた。震央距離の正負は, 震央に対して南側にあるため池を正とした。

最近断層距離( $d_{NF}$ ): あるため池から最近断層までの最短距離,  $CN$ 。N( $x_{NF}, y_{NF}$ )は最近断層上の当該ため池への最近点。最近断層距離の正負は, 断層に対して南側にあるため池を正とした。

震央角度( $\theta_E$ ): 各ため池の堤軸中心Cから下流への法線( $n_C$ )と線CEとの交角。

最近断層角度( $\theta_{NF}$ ): 最近断層上のため池からの最近点N( $x_{NF}, y_{NF}$ )の法線 $n_{NF}$ と, 堤軸の下流への法線( $n_C$ )との交角。

震央角度・最近断層角度は, 堤軸法線 $n_C$ から時計回りを正とした。360度を10度ずつ, 36カテゴリーとしている(360度表示と称する)。

なお, 北淡町の解析(Fujii et al., 2000b)では, データ数が少なかった(509個)ので, 堤軸法線の向きを無視し, 10度ずつ18カテゴリー(180度表示と称する)に変換した。すなわち, 360度表示で法線の角度が180~350度の各カテゴリーは, 180度表示では, それぞれと点对称の0~170度のカテゴリーに分類される。この場合, 堤軸と貯水池の位置関係は無視される。例えば, 震央角度が0度(正対)というとき, 「震央—貯水

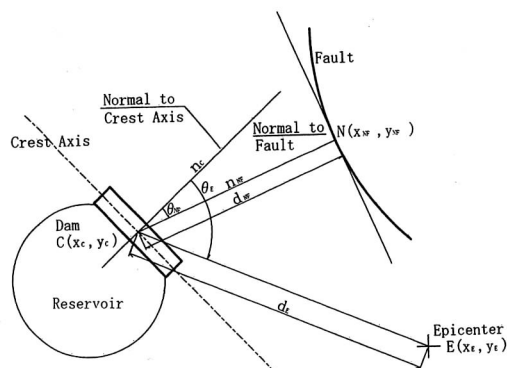


Fig. 2 Measurement of distance and angle to epicenter and to nearest fault



池一堤体」(池が表側と称す)か、「震央一堤体一貯水池」(池が裏側と称す)かは区別がつかない。そこで、5町領域の1788個についても、180度表示として分類して解析し、360度表示の解析結果および北淡町の結果(Fujii, H., et al., 2000b)と比較検討する。

3) ダムサイトの標高: ため池を同定した上で、地形図からダムサイトの標高を求めた。

4) ダムサイトの表層地質: 地質図(地質調査所, 1992a, 1992b, 1996)によると、5町領域の地質は21種あるが、これらを大きく6種のカテゴリーに分けた。すなわち、①花崗岩系(花崗斑岩・粗粒黒雲母花崗岩・花崗閃緑岩等)、②砂岩・礫岩系(このほか角閃石ひん岩等も含めた)、③泥岩を含む岩、④礫、⑤非粘性土(砂など、粘土を含まない土)、⑥粘性土(泥・粘土を含む土)である。

5) 堤体量: (堤高) × (堤長)。予備解析の結果、堤高も堤長も被害への関わりは同じ傾向を示したので、アイテム数を減じるために設けた。

6) 堤軸の平面形状: 構造的に被害に影響すると考えられたので、①単軸(谷に直交する一軸の堤体で、最も一般的なもの)、②多軸(堤軸が折れ曲がったもの。池周辺が堤体となっている皿池型もこれに入る。)の2種に分けた。

7) 地震前の改修・漏水の有無: ため池は、改修すると強固になり、漏水があると被害を受易いと考えられている。ため池台帳(兵庫県, 1977a)から求めた。1977年以後状況の変化の可能性はあるが、記述をそのまま用いた。

北淡町の分析(Fujii et al., 2000b)では、「連続池」、「築堤年代」を要因として用いている(5.3項参照)。連続池とは、ため池が2個以上連なっており、いわゆる「親子池」と称されるものである。上流側ため池の下流法尻が、下流側ため池の貯水敷にある。したがって、法尻は浸潤状態が続くことが多く危険側にあると考えた。地形図・空中写真から求めた。また築堤年代は、ため池堤体の老朽化が堤体の被害を招くという考え方が一般的なので取り上げた。ため池台帳の記載では漠然としたものがあるので、明治24年作成の土地台帳(北淡町, 1891)から求めた。現在のため池位置

と、当時の土地利用状況を比較し、1891年以前・以後の築造のため池に分類した。

### 3. 数量化理論Ⅱ類による多変量解析

#### 3.1 数量化理論Ⅱ類について

前項で仮定した各アイテム(要因)の被害への影響を知ろうとして数量化理論Ⅱ類(田中・垂水, 1997)による多変量解析をおこなった。解析ソフトはSPSS(垂水, 1995)を用いた。

数量化理論Ⅱ類は、「質的な外的基準」(本研究では、ため池堤体の被害および無被害)を「質的なアイテム」によって判定するための手法で、判別方程式と呼ばれる次式が使われる。

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

ここで、 $y_{im}$  はサンプルスコア、 $x_{imjk}$  はダミー変数と呼ばれる。例えば、あるため池  $m$  が被害 ( $i = 1$ ) (または無被害;  $i = 2$ ) ため池で、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) に属する時、 $x_{imjk}$  は 1、属さない時、0 とする。 $A_{jk}$  は カテゴリースコア (以下原則として CS と記す) 呼ばれ、被害及び無被害ため池を最も明確に区別するよう決定された数値である。CS は カテゴリー  $k$  の被害に対する相対的な寄与率を表すことになる。また各アイテム  $j$  の被害に関する相対的な寄与率は、偏相関係数の値で表される。

#### 3.2 文書データの検証

多変量解析に先立ち、ため池台帳(兵庫県, 1997)に記載されているため池の堤長と堤高の数値(記載値と呼ぶことにする)を確認するために、現地調査の実測値62個と比較した(Fig. 3)。

実測値(横軸:  $x$ ) に対する記載値(縦軸:  $y$ ) の関係は、堤長(Fig. 3a)より堤高(Fig. 3b)がばらついている。しかし回帰直線の勾配は、堤長が1.044、堤高が1.023であり、ほぼ1対1と対応している。また、相関係数もそれぞれ0.932および0.848と相関性は高い。従って、解析にはため池台帳の記載値をそのまま用いることにした。

### 4. 多変量解析結果と論議

#### 4.1 分析の精度についての論議

##### (1) 相関係数・相関比

数量化理論Ⅱ類による算定結果の内、各アイテムの偏相関係数を Fig. 4 に、それぞれのアイテムのカテゴリーの CS を Fig. 6 に示す。

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は、相関比、判別の中率((2)項)、レンジ((3)項)等で表わされる。「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)。これを重相関係数と呼ぶこととし、 $R'$ と記す。

Table 1 に、180 度表示と 360 度表示の相関比、重相関係数を記した。相関比はそれぞれ、0.186 および 0.206 と小さく見える。しかし、データ数  $n$  の相関比  $R$  は、

$$R > 4/(n + 2) \quad (2)$$

であれば相関があるとされている(上田他, 2003)。本研究ではため池数 1788 だから 0.002 が得られ、いずれの相関比はその 100 倍前後あり相関性は高いといえる。

##### (2) 判別の中率

判別の中率  $H_R$  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である。これは(菅, 1993)、

$$H_R = (U_u + D_d)/(U + D) = (U_u + D_d)/T \quad (3)$$

と定義される。ここで、 $U$ ：実際の無被害ため池個数、 $D$ ：実際の被害ため池個数、 $T$ ：全数 ( $T = U + D$ )、 $U_u$ ：実際の無被害ため池を、(1)式により正しく無被害と判別した個数、 $D_d$ ：実際の被害ため池を、正しく被害と判別した個数、 $U_d$ ：実際は無被害ため池であるのに、(1)式により誤って被害と判別した個数 ( $U_d = U - U_u$ )、 $D_u$ ：実際は被害ため池なのに、誤って無被害と判別した個数 ( $D_u = D - D_d$ )、とする。

Table 1 に  $U_u$ 、 $D_d$ 、 $U_d$ 、 $D_u$  と共に判別の中率  $H_R$  を示した。判別の中率は、360 度表示が 74.0 %、180 度表示が 73.5 % であり、この解析は正しいように見える(菅, 1993)。一方北淡町の判別の中率(藤井ら：2000b)も 73.5 % であった。こ

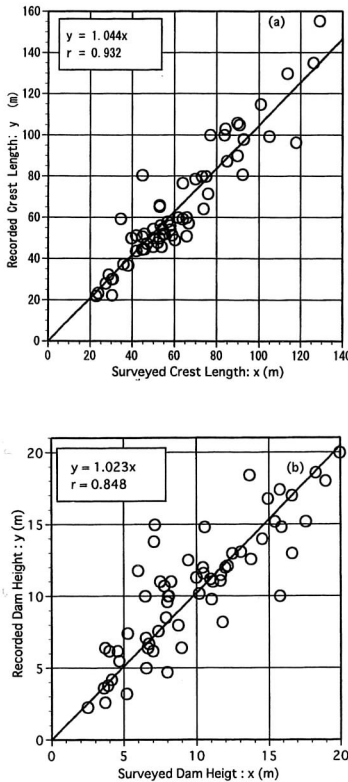


Fig. 3b Comparison surveyed and recorded date; (a) Dam height and (b) Dam Length

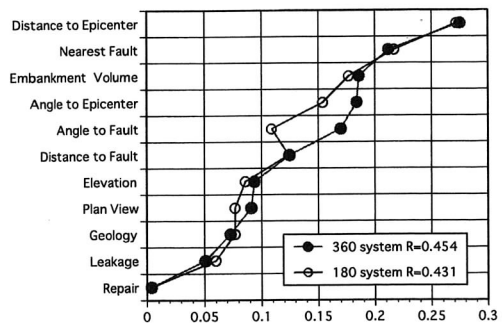


Fig. 4 Partial Correlation coefficient of 360 and 180 degree systems

Table 1 Accuracy of multivariate analysis

CASE		Five Town		Hokudan		
		180-degree	360-degree	180-degree		
Correlation Ratio		R	0.186	0.206	0.280	
Correlation Coefficient		R'	0.431	0.454	0.529	
Number of Dams Discriminated by eq.(1)						
	Actual	Model				
	Undamaged	Undamaged	Uu	1070	1076	250
	Undamaged	Damaged	Ud	105	103	57
	Damaged	Undamaged	Du	368	362	78
	Damaged	Damaged	Dd	245	247	124
Undamaged		U	1438	1438	328	
Damaged		D	350	350	181	
Total		T	1788	1788	509	
Hitting Ratio by eq. (3)		H <sub>R</sub>	73.5%	74.0%	73.5%	
Hitting Ratio due to Probability by eq. (4)		H <sub>RS</sub>	68.5%	68.5%	54.2%	
Relative Accuracy by eq. (5)		R <sub>A</sub>	1.07	1.08	1.36	

れは同じ数値であるが、同じ精度を表すとはいえるのであろうか。そこで藤井 (Fujii et al., 2000b) は、基準となる指標として、確率的に得られる判別の中率を次ぎのように提案した。

本研究のような場合、被害ため池個数 (D) と無被害ため池個数 (U) の数は既知である。多変量解析の対象としている T (= D + U) 個のため池から、無作為に 1 個選び、それが被害ため池である確率は D/T、無被害ため池である確率は U/T である。したがって T 個から D 個選び、それが偶然に被害ため池である理論的 (確率的) な個数 D<sub>d</sub> は、D<sub>d</sub> = D · (D/T) となる。同じく、T 個から U 個選び、それが偶然に無被害ため池である個数 U<sub>u</sub> は、U<sub>u</sub> = U · (U/T) となる。これらを (3) 式に代入し H<sub>RS</sub> とすれば、

$$H_{RS} = (D^2 + U^2)/T^2 \quad (4)$$

となる。H<sub>RS</sub> は確率的に得られる判別の中率であるから、「確率的判別の中率」と定義する。

確率的判別の中率 H<sub>RS</sub> は、被害数 D と無被害数 U 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) な値である。したがって、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ことが必要であろう。判別の中率と確率的判別の中率 H<sub>RS</sub> の比 R<sub>A</sub>,

$$R_A = H_R/H_{RS} \quad (5)$$

を「相対精度」と定義すれば、R<sub>A</sub> は少なくとも 1.0 を上回ることが必要となる。

北淡町では D=181, U=328 であるから H<sub>RS</sub> は (4) 式から 54.2%, 5 町領域では、D=350, U=1438 であるから H<sub>RS</sub> は同じく (4) 式により、68.5% となる。そしてこのとき R<sub>A</sub> は (5) 式から、北淡町で 1.36 (=73.5/54.2), 5 町領域では 180 度表示が 1.07 (=73.5/68.5), 360 度表示が 1.08 (=74.0/68.5) となる。すなわち、同じ判別の中率でも相対精度は北淡町の方が大きい。Table 1 には R<sub>A</sub> も記している。いずれも 1.0 を上回り、解析モデルは必要条件を満たしているといえよう。

なお (4) 式からわかるように、確率的判別の中率は D と U の比によって大きく変わる。すなわち D と U の差が大きければ大きい程確率的判別の中率は大きくなる。例えば、ため池総数 (T) 1000 個のデータがあるとする。その内被害数が 100 個、無被害数 900 個の場合、確率的判別の中率 H<sub>RS</sub> は 82% となる。しかし、被害・無被害同数 (U = D = 500) の場合 H<sub>RS</sub> は 50% となり、両者は大きく異なる。したがって判別の中率は、この確率的判別の中率と比較して論ずべきで単に数値の大小で捉えるべきではない。異なったデータ数を持つ 2 つの解析結果をそれぞれの判別の中率で論ずることは意味がないといえる。

### (3) レンジおよび分析精度

「レンジ」は、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ほぼ一致するとされる(菅, 1993)。

Fig. 5 に偏相関係数とレンジを示す。堤体量と震央角度のレンジの順序が偏相関係数と逆になっている。これは偏相関係数は両者ほぼ同じとき、往々にして起こりうるとされる(上田, 2003)。この場合も両者の偏相関係数はほぼ同じであり、結果は正しいとしてよい。

このように、360度表示および180度表示の算定結果、それぞれ相関比は0.186および0.206、重相関係数は0.43および0.45、判別の中率は確率的判別の中率68.5%に対して73.5%および74.0%、相対精度1.07, 1.08であり、サンプル数を考えれば(菅, 1993, 上田, 2003)、解析モデルおよび解析結果は信頼できるとしてよい。

この算定結果に基づき、次項から各アイテム、カテゴリの被害・無被害との関係を論ずる。

### 4.2 各アイテムの被害への寄与と偏相関係数

Fig. 4 に、360度表示と180度表示の偏相関係数の算定結果を、360度表示の偏相関係数の大きさの順に並べている。被害に影響を与える7位までのアイテムは、震央距離、最近断層、堤体量、震央角度、最近断層角度、最近断層距離、標高であり、3~5位が堤体の「構造」、それ以外はため池の「位置」に関するものである。また堤体量以外は震源・断層に関するアイテムすなわち地震関連要因である。180度表示は、360度表示と比べると、最近断層角度と最近断層距離の順位が逆転し、それぞれの偏相関係数は360度表示より小さい。しかし、他の項目は360度表示とほぼ同じである。なお、360度表示と180度表示の比較は改

めて5.2項で述べる。

### 4.3 各カテゴリの被害への寄与

#### (1) カテゴリスコア (CS) と被害率

Fig. 6 には、アイテム毎に各カテゴリのCSを示している。マイナスが被害側になる。「CSが大きい」という場合、絶対値の大きいマイナスのCS(被害により影響を与える)のことである。

図には被害率も併記している。被害率は、各カテゴリの、(被害ため池数)/(ため池数)の百分率である。また、図の各カテゴリ名の後ろにある( )内の数字はそのカテゴリでのサンプル数を示す。被害率の表記は、基準となる平均被害率20%(被害ため池数350個、無被害ため池数1438個だから19.8%≒20%)の値を、CSの0に一致させて示している。CSはこれと比較のため正負を逆順で示している。つまり、CSの0の右が被害側、左が無被害側となる。

本節では、360度表示の結果を中心に述べ、180度表示については一括して後述(5.2項)する。

#### (2) 震央距離

震央距離(Fig. 6a)は15km以内つまり18km未満でCSがマイナスで被害に関わることを示す。しかし、この区間において被害率は平均値以上であるが、ほぼ一定値(27~30%)を示すのに対して、CSの最大値は9km(-1.29)に生じ、

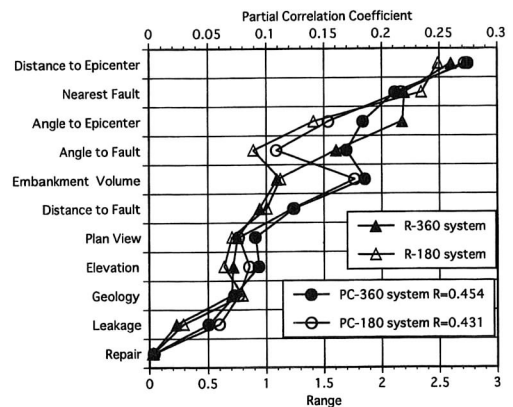


Fig. 5 Range and partial correlation coefficient for each items

12 km (-1.15) がこれに次ぎ、震央近傍ではかえって小さい (3 km ; -0.24, 6 km ; -0.59)。一見奇異に見えるが、この区間は気象庁発表の震度7地帯 (気象庁, 1997) とほぼ一致する。これは、北淡町でも同様の傾向を示した。すなわち、震度7地帯においてため池被害も最大になることを示す。このことは、被害率つまり単変量の整理ではよくわからないが、多変量解析で明確となる。

### (3) 最近断層

Fig. 1 の15活断層のうち、マイナスのCSを示すのは、Fig. 6bのように、D2 (-0.92), 安乎 (-0.64), 野島 (-0.56), 水越 (-0.50), 一宮 (-0.38), 浅野 (-0.28), D4 (-0.23), 志筑 (-0.14) の8断層である。一方、被害率が平均値 (19.6%) を越えるのは、D2, 水越, 野島, 浅野の4断層のみである。D2断層はCSも被害率も最も高いが、データ数が9個と少ない。また安乎・D4断層はCSはマイナスだが、被害率は平均値以下である。しかしこの2断層の近傍は震度7地帯 (気象庁, 1995) であることに注目したい。水越撓曲, 浅野断層, D2断層も同様に震度7地帯に近い。しかも、これは震源断層といわれる野島断層の延長上にある。一宮撓曲は、さらにその延長線にある。すなわち、これらの6断層は野島断層同様、被害に関係していた可能性がある。そして多変量解析の傾向は震度7地帯の分布を反映しており、被害率より実情を表しているといえよう。

### (4) 堤体量

堤体量の偏相関係数の順位は3位 (Fig. 4) で、地震関連のアイテムが上位を占める中、唯一の非地震関連アイテムである。堤体量のCSおよび被害率は、Fig. 6cのように堤体量が大きい程被害は増すことを示す。

ここで、堤体量 (= 堤高 × 堤長) を算定した堤高および堤長の個々の被害率を示すと Fig. 7 のようになる。堤長の値が大きい程 (Fig. 7a) 被害も大きい。堤高 (Fig. 7b) も同様な傾向を示す。なお、このことについて、藤井らは数値解析的に検討し、起こりうることを示した (Fujii et al.,

2000a)。

### (5) 震央角度・最近断層角度

震央角度 (Fig. 6d) でCS・被害率共に被害側のカテゴリは、0, 10, 70, 90, 100, 140 - 180, 280, 290, 340度である。このうちCSが大きい (ほぼ-0.5以下) は、0, 10, 100, 160, 280, 290, 340度で特に280度が大きい。すなわち震央に対して、堤軸がほぼ正対あるいは直交したものの被害が大きいといえる。

最近断層角度 (Fig. 6e) でCS・被害率共に被害側のカテゴリは0, 90, 100, 200, 240, 330 - 350度で、このうちCSが大きいのは、90, 100, 200, 350度で特に350度が大きい。これも、最近断層に対してほぼ正対および直交のカテゴリは被害が大きいといえる。なお、震央角度・最近断層角度については、180度表示と比較して後述 (5.2項) する。

### (6) 最近断層距離

最近断層距離のCS (Fig. 6f) は、±250 mを除く-750 m~750 m, および-2000 m以遠がマイナスを示す。また、被害率は250 mを除く750 m~-750 mの範囲が平均値より高い。よって例外はあるが、-750 m~750 mが被害を受易いといえよう。-2000 mのCSが大きいのは、最近断層以外の、より影響力ある断層に影響されている可能性が高い。

そこで最近断層 ((3) 項) のうち、CS・被害率共に高く、データ数も比較的多い野島断層のみに注目して被害率を算定してみる。すなわち、野島断層の両端点において直交する直線で囲まれた (いわば、この2直線で淡路島を切り取った) 領域を設定し、その領域のため池を同定して、「野島断層からの距離」(野島断層距離と称す) と被害率の関係を算定した (Fig. 8)。該当するため池数は402個 (被害112個, 無被害290個) で、平均被害率は27.9%である。野島断層は、Fig. 1のように海寄りがあるので、断層より海側 (マイナス側) のため池は少ない。被害率は500 mをピークに左右に広がり、-500 m~1000 mが平均値より高

い。これらの図から、最大被害は野島断層から 0 ~500 m, つまり野島断層直上よりやや山沿いに生じ、影響範囲は比較的小さいといえる。また、最近断層距離より野島断層のような被害に強く関わる断層について整理する必要も示している (藤

井ら, 2004b)。

(7) 標高地

標高については、CS から 50 m 未満、150 m 以上 200 m 未満が被害を受けやすく (Fig. 6g), 被

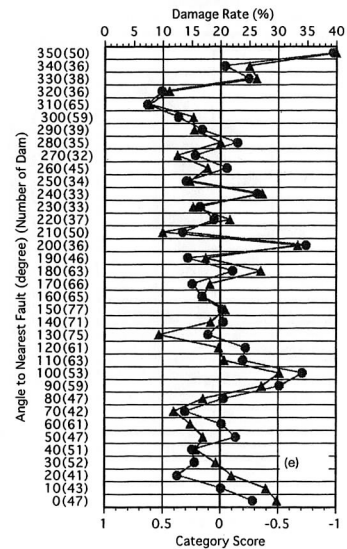
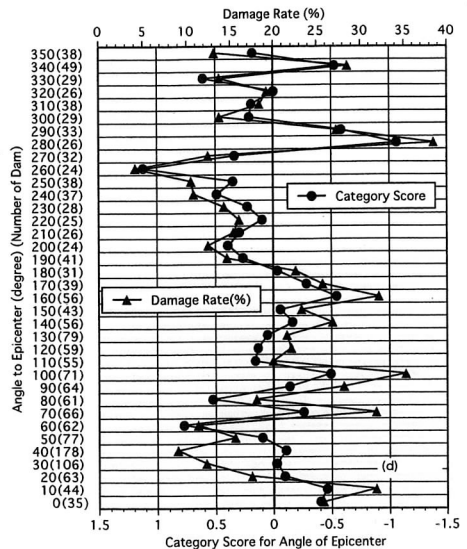
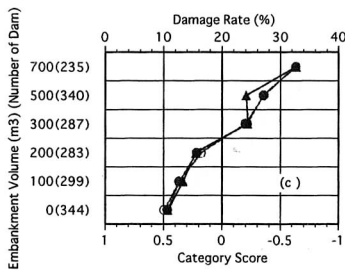
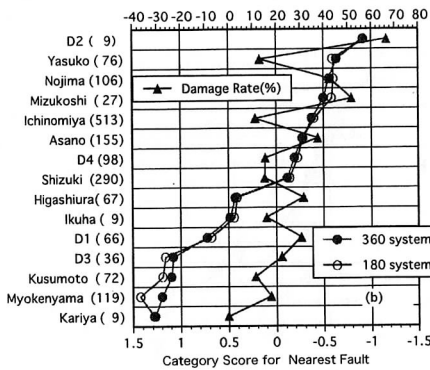
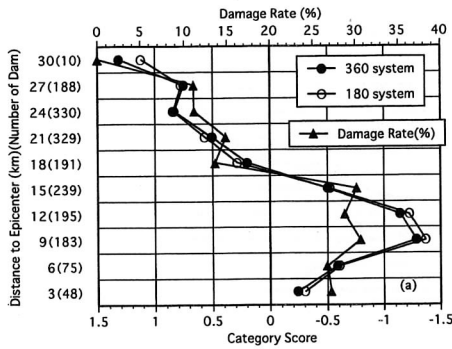


Fig. 6 Category score and damage rate (a) Distance to epicenter, (b) Nearest fault, (c) Embankment volume, (d) Angle of epicenter, (e) Angle of nearest fault,

害率から 150 m 以上で被害が大きという傾向が出ています。低地のため池が堆積層上にあること、高地で加速度が増幅される可能性等、考えられないこともないが、現段階では明言できない。

堤軸の平面形状 (Fig. 6h) は、多軸が単軸より被害を受易い結果がでており、当然といえよう。

表層地質 (Fig. 6i) の CS は、土質地盤 (粘性土、非粘性土) が岩質地盤より被害を受易いことを示し、礫はまさにその境界にある。被害率は、土質地盤と共に、砂岩・花崗岩も平均値より大き

い。すなわち、砂岩、花崗岩上のため池が被害を受易いことになり、単変量解析からは誤った判断を下すことになる。

地震前の漏水 (Fig. 6j) のない方が被害側であるが、技術的観点からすればおかしい。しかし、大小の 1788 個のため池の漏水の有無を、数人あるいは数十人が、技術的に同じ精度で調査することは不可能に近いと思われる。よってデータの利用には注意を要するといえよう。

地震前の改修 (Fig. 6k) の有無と被害の関係は、

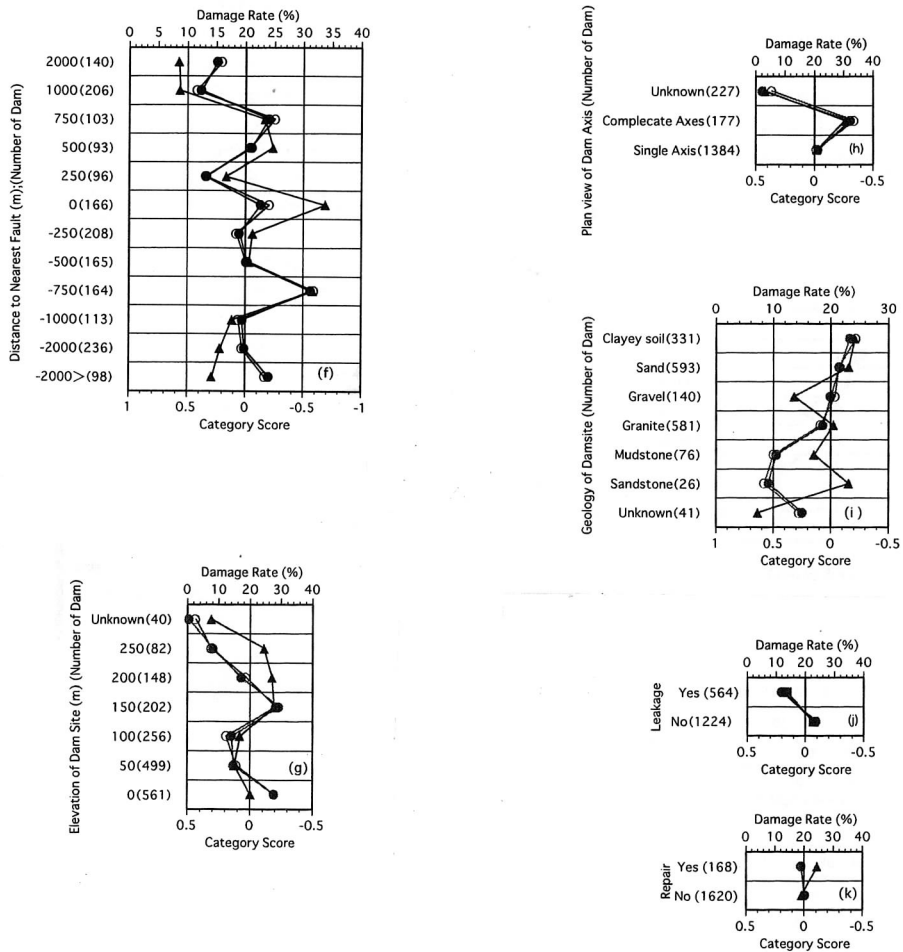


Fig. 6 Category score and damage rate (cont.)

(f) Distance to nearest fault, (g) Elevation of dam site, (h) Plan view of crest axis, (i) Surface geology of dam site, (j) Leakage before earthquake, (k) Repair before earthquake



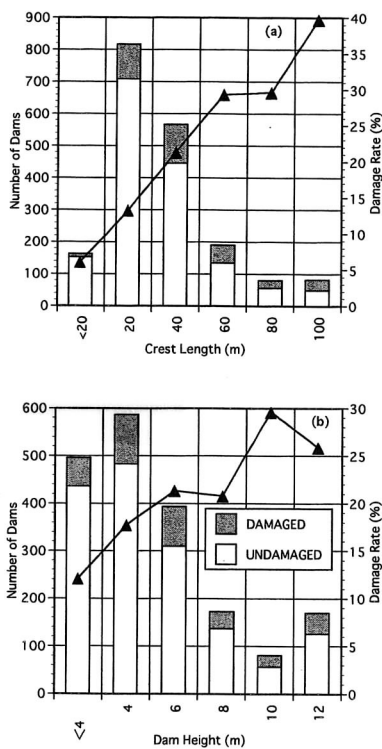


Fig. 7 Relationship between damage and (a) Crest length, and (b) Dam height

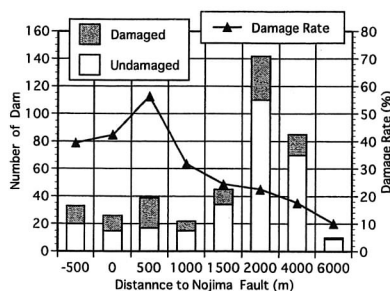


Fig. 8 Relationship between damage rate and distance to Nojima fault

CS からは改修した方の被害が少ないという当然の結果がでている。しかし、被害率からは、改修した方が被害を受易い結果になる（技術的観点からすればおかしい）。これも、単変量解析では誤った解釈をすることになる。

ただし、漏水にしても改修にしても CS は小さく、被害に与える影響は小さい。

## 5. 総合的な論議

### 5.1 被害に大きな影響を与えるカテゴリー

4.2 項で各アイテムの被害への関与を、また 4.3 項でそれぞれのアイテムに属するカテゴリーの被害への影響を述べた。では、それぞれのカテゴリーが全カテゴリーのうちでどの程度被害に関わっているのだろうか。

数量化理論Ⅱ類で求められる CS はアイテムに関係なく比較できる。これは、多変量解析の大きな利点といえよう。360 度表示の 11 アイテム 136 カテゴリーのうち、65 カテゴリーがマイナスである。その上位 25 位は Fig. 9 のようになる。このうち、地震関連は、震央距離 4, 震央角度 7, 最近断層 5, 最近断層距離 1, 最近断層角度 5 カテゴリーで、震源関連・断層関連のカテゴリーが同数 (11 個, 45 % づつ) 含まれている。一方、非地震関連では、堤体量 ( $700 \text{ m}^3$ : 9 位,  $500 \text{ m}^3$ : 23 位) および堤軸の平面形状が多軸 (25 位) の 3 カテゴリーのみである。

最も被害に関わるカテゴリーは震央距離 9 km で、同 12 km, 震央角度 (280 度), 最近断層角度 (350 度), 最近断層 (D2 断層), 最近断層角度 (200 度, 100 度), 安乎断層, 堤体量 ( $700 \text{ m}^3$ ) と続く。当然地震関連のカテゴリーが上位を占め、断層より震央の影響の方が大きい。これらは、震度 7 地帯にあるもの、震央および最近断層に対しほぼ直交または正対のものといえる。

### 5.2 180度表示と360度表示の比較

#### (1) 概括

Fig. 4 に示したように 180 度表示の偏相関係数は、360 度表示に比べ、震央角度で 0.03 (16 %), 最近断層角度で 0.06 (36 %) 小さい。しかし、その他のアイテムの両者の偏相関係数はほぼ一致している。各アイテムの CS も、4 章で触れなかった震央角度・最近断層角度以外の傾向はほぼ一致している (Fig. 6)。

180 度表示の各カテゴリーの被害への関わり

順位は Fig. 10 のようになる。180 度表示では、11 アイテム 100 カテゴリーである。上位 18 カテゴリーは、震央距離 5、最近断層 5、震央角度 2、最近断層距離 1、最近断層角度 2 で、震源関係、断層関係ではほぼ半々を占める。非地震関連については堤体量 (700 m<sup>3</sup>, 500 m<sup>3</sup>)、堤軸平面形状多軸の 3 カテゴリーである。

360 度表示 (Fig. 9) と比べると、1・2 位の震央距離 9 km, 12 km は変わらないが、3 位は最近断層 (D2 断層) になり、震央角度 (80 度, 60

度)、堤体量 (700 m<sup>3</sup>)、震央距離 (6 km)、最近断層 (野島断層, 安乎断層) と続く。角度のカテゴリー以外は、ほぼ一致しているとしてよい。ただし、野島断層と安乎断層の順位のみは逆転しており、角度のカテゴリー分けの影響といえよう。

そこで本節では、震央角度・最近断層角度の 360 度表示と 180 度表示の解析結果を比較する。特性を明確にするために、両表示の震央角度 (Fig. 11・Fig. 12) および最近断層角度 (Fig. 13・Fig. 14) の CS および被害率を円グラフで示した。

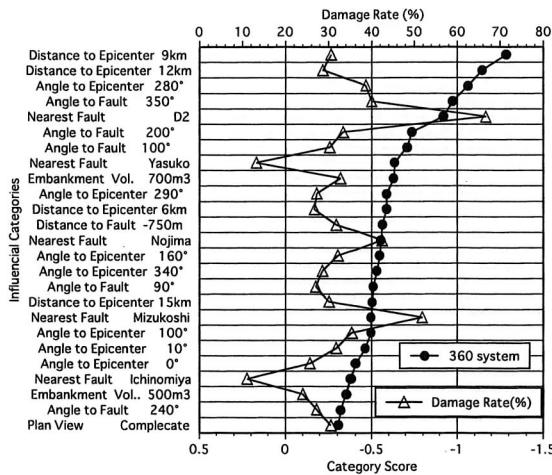


Fig. 9 Influential 25 categories of 360 system

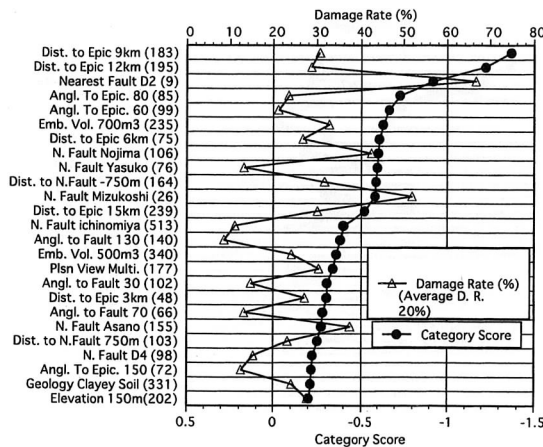


Fig. 10 Influential 25 categories of 180 degree system

なおCSの値は、被害率と比較するため＋を逆にして表記している。

### (2) 震央角度

180度表示 (Fig. 11b) で被害の大きい (大略0.1以下) カテゴリーの順位は100, 160, 0, 140, 10, 110度で、ほぼ正対、直交の堤体が多い。一方、360度表示 (Fig. 11a) のこれらのカテゴリー、及びこれらと点对称のカテゴリー (280, 340, 180, 320, 190, 290度) にもピークが見られる。例外はあるが (160度と340度, 140度と320度はほぼ同じ)、点对称の一对の片方が大きい。すなわち、100度より280度が、180度より0度が、190度より10度が、110度より290度がそれぞれ大きい。言い換えると、2.2 (2) 2) 項の定義から、「震央」—「堤体」—「貯水池」 (池が裏側)

の位置関係のものが、「震央」—「貯水池」—「堤体」 (池が表側) より被害が多いといえる。このことは、被害率 (Fig. 12) についてもほぼ同様である。このように、被害に関わるのは堤軸の向きだけでなく、池の位置が重要であることが、360度表示の解析結果でわかる。

### (3) 最近断層角度

180度表示の場合、CSの大きいのは (Fig. 13b), 100, 170, 90, 20, 0, 60, 150度で、震央角度同様ほぼ正対および直交が多い。被害率 (Fig. 14b) もほぼ同様である。断層と堤軸と貯水池の関係は、震央角度のように一様ではない。Fig. 13aに見られるように、ほぼ正対し「池が裏側」のため池堤体が、「池が表側」より被害の大きいカテゴリーの組合せは、350 - 70度, 0 - 170度,

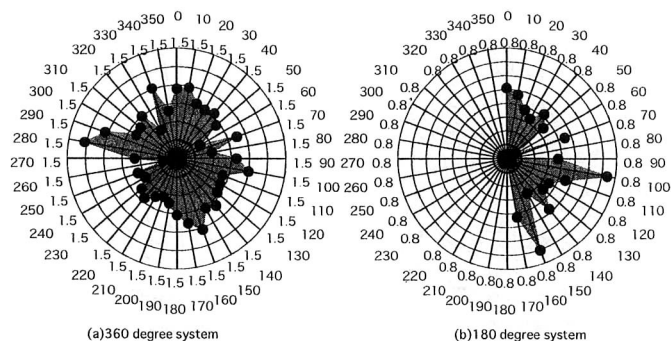


Fig. 11 Category score for angle of epicenter

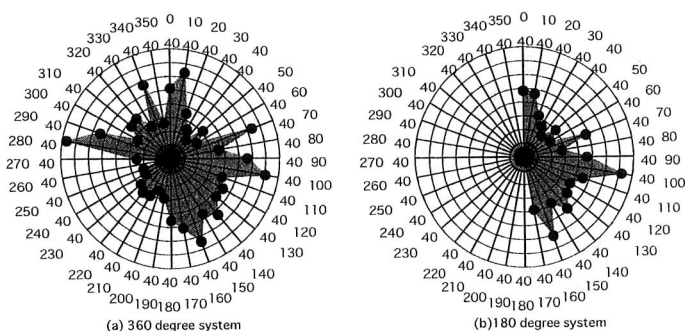


Fig. 12 Damage rate of angle to epicenter

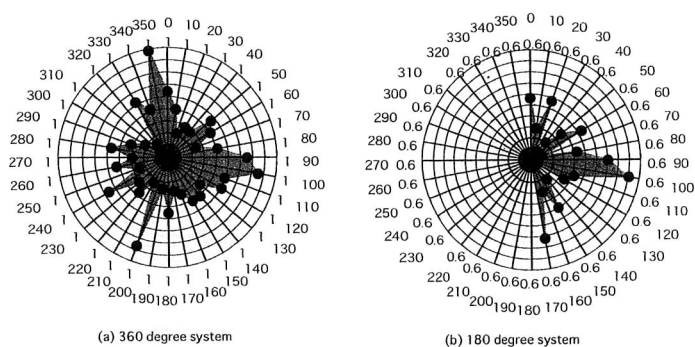


Fig. 13 Category score for angle of nearest fault

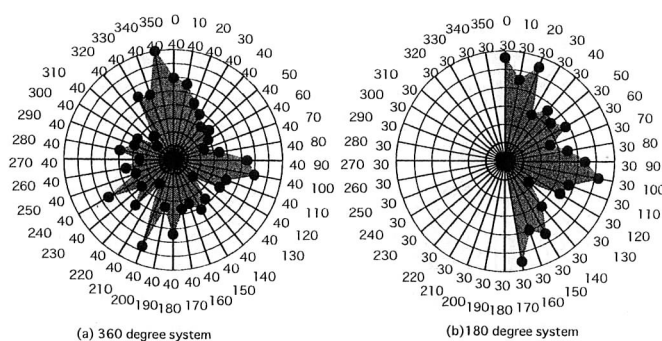


Fig. 14 Damage rate of angle to nearest fault

330 - 150 度のみである。ただし、震央角度に比べ、ほぼ正対および直交のものの被害はより大きい傾向にある。

### 5.3 北淡町領域と 5 町領域の比較

ここで、北淡町の結果 (Fujii et al., 2000b) と、5 町の 180 度表示の結果と比較する。5 町領域のデータには、当然北淡町のデータも含まれているが、領域の広さ・データ数の違い (5 町領域 : 1788 個, 北淡町 509 個) から、アイテム, カテゴリー分け (北淡町 : 13 アイテム, 94 カテゴリー) が異なり、相関比も偏相関係数も異なる。ただし、両領域の判別率的中率は同じ値を示した。しかし確率的判別率の中率に対する相対精度は、5 町領域の方が低い (4.1 (2) 項参照)。よって一概に比較できないが、主な項目について述べる。

Fig. 15 に、北淡町と、5 町領域の偏相関係数を示す。偏相関係数の 1 位は、5 町領域では震央距離 (北淡町 5 位) であるのに、北淡町は最近断層で、大きく順位が変わっている。堤軸平面形状・表層地質などの順位が変動しているが、これは後述のカテゴリー分けの差によるものと思われる。その他北淡町に比べ、2 位以上の差異の出たアイテムは、最近断層角度 (上昇), 最近断層距離 (下降) である。非地震関連項目では、堤体量が北淡町 (2 位) 同様 (3 位) 大きく被害に関わる。堤軸の平面形状, 表層地質がこれに続き、北淡町と同じ傾向を示す。改修は両領域とも最下位で、漏水がその上位になる。北淡町ではこの間に築堤年代 (11 位) と連続池 (12 位) が入っていた。

北淡町領域の被害に大きく関わる上位 25 位のカテゴリーを Fig. 16 に示し 5 町領域の 180 度表

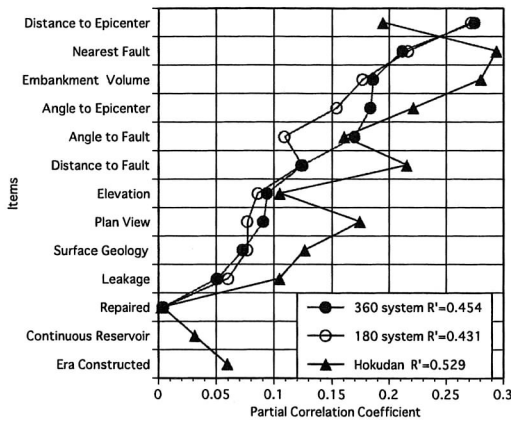


Fig. 15 Comparison of Hokudan town and northern five towns area on partial correlation coefficient

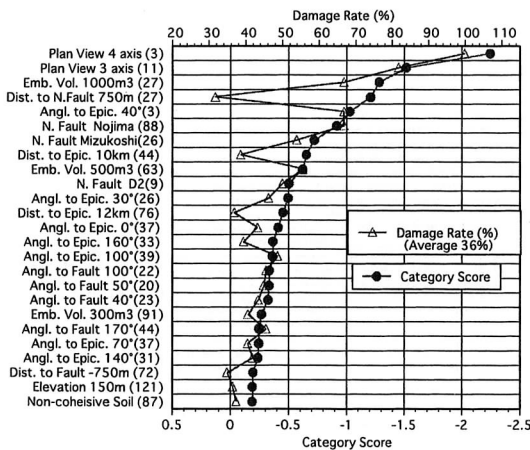


Fig. 16 Influential 25 categories of Hokudan town

示 (Fig. 10) と比較する。堤軸の平面形状 4 軸・3 軸が 1・2 位を占め、堤体量 1000 m<sup>3</sup> 以上が 3 位となり、5 町領域 (Fig. 10) の 1 位・2 位 (震央距離 9 km・12 km) とは異なる。これはカテゴリー分けが、北淡町 (堤軸：1～4 軸、堤体量：500・1000 m<sup>3</sup>) と 5 町領域 (堤軸：単軸・多軸、堤体量：500・700 m<sup>3</sup>) では違うことによるため、同じになれば順位は下がる筈のものである。

ただし、堤体量が大きい程被害が大きいという

傾向、多軸が被害側であるという傾向は、両領域共一致していた。

震央距離は、北淡町 (8 位, 12 位) に比べ 5 町領域では影響を強める (1 位, 2 位, 7 位, 10 位)。しかし両者の CS の傾向は一致 (10 km 付近の被害が最大) している。また北淡町で野島 (6 位)・水越断層 (7 位) より低位の D2 断層 (10 位) が、5 町領域では野島 (9 位)・水越 (11 位) より上位 (3 位) となり、被害に大きく関わる。

最近断層距離は、北淡町 (4 位, 23 位) に対し 5 町領域 (7 位, 24 位, 25 位) と影響を弱めるように見える。しかし、図 (Fig. 10, Fig. 16) には表されていないが、断層直近のカテゴリー (0～250 m) は、北淡町 (40 位) より 5 町領域 (34 位) が被害に影響する。両領域共、震央角度 (5 町：4・5 位, 北淡町：5・11・12・15 位) は、最近断層角度より上位にある。ただしより被害に関係する震央角度は北淡町領域が斜交 (45°) に近いのに対し、5 町領域は直交 (90°) に近い。

ちなみに本論では取り上げていない北淡町の連続池 (あり) は 28 位、築堤年代 (1891 年以前) は 42 位で被害側であった。

このように、最も大きく被害に影響を与えるアイテムは、北淡町のように小領域では最近断層であるのに対し、5 町領域のような広領域では (Fig. 10) 震央距離となる。そして広領域と小領域で、被害への差がでるアイテムは、地震関連 (震央距離・震央角度・最近断層・最近断層距離・最近断層角度) あるいは位置関連 (震央距離・最近断層・最近断層距離・標高) のものといえる。また地震非関連の堤体量の影響は両領域共大きい。

#### 5.4 カテゴリースコアと被害率

4.3 項で述べた各アイテムのカテゴリースコアと被害率は、傾向が一致しているものと、していないものがある (Fig. 6 参照)。ここで一致しているものとは、各カテゴリーの被害側 (CS：マイナス, 平均被害率：19.8%以上) および無被害側 (CS：プラス, 被害率：19.8%未満) で CS・被害率の組合せが一致し、かつ各カテゴリーの被害への寄与の順位が対応しているものとする。

CS・被害率の傾向がほぼ一致しているアイテムは、堤体量 (Fig. 6c), 最近断層距離 (Fig. 6f), 堤体の平面形状 (Fig. 6h), 地震前の漏水 (Fig. 6j) である。したがってこれらのアイテムは、多変量解析によらなくても、普通の解析 (単変量解析) で同じ結果が得られる。

一方、CS・被害率の傾向が異なるアイテムは、震央距離 (Fig. 6a), 最近断層 (Fig. 6b), 震央角度 (Fig. 6d), 最近断層角度 (Fig. 6e), 標高 (Fig. 6g), 表層地質 (Fig. 6i), 地震前の改修 (Fig. 6k) である。したがって、これらのアイテムについては、単変量の慣用的な統計分析結果のみで被害への関連を論ずると誤った解釈がなされる可能性に留意すべきである。

### 5.5 震源と断層の影響

Fig. 9の被害に大きく関係する25カテゴリーに、震央角度と最近断層角度が12カテゴリー入っているが、両者にはかなりの相関がある (Fujii et al., 2000b)。例えば、野島断層は南西から東北に伸びており、同方向に震源がある (Fig. 1)。従って、野島断層に正対したため池 (つまり最近断層角度0度) の堤軸はほぼ震央に向かってくる (震央角度90度または270度) ことになる。Fig. 9の3位の震央角度280度と4位の最近断層角度350度はこの関係になる。同図には他の幾つかの組合せがみられる。

ところで、5町領域では顕著でないが、北淡町では震央角度・最近断層角度共に、40度付近に被害のピークがみられた (Fujii et al., 2000b)。このことは、Fig. 16にみられるように、震央角度 (40度・30度), 最近断層角度 (50度・40度) が94カテゴリーの上位にあることからわかる。45度付近のピークは、震源断層からくる地震波と、これにほぼ直交する震央方向からの地震波が合成されるとすれば起こりうるとされる (Miyatake, 1999)。そして、震源断層からの地震波が震源からの地震波より小さいとすれば、合成波の影響は断層のごく近傍にしか生じないことになる。藤井 (Fujii et al., 2000a) は、このことは数値解析的にも生じうることを示している。よって、この現象

は、北淡町の様な小領域では顕著であるが、5町領域の様な広領域ではあまり現れないことになる。

一方、震央距離および最近断層距離は、4.3 (2) 項および4.3 (3) 項で見たように、被害にはそれぞれ関わっている。

したがって、震央角度・最近断層角度、震央距離・最近断層距離に関する被害の状況から、両者は相関性があるが、同時にそれぞれは独立して被害に関わっていることになる。すなわち、震源・断層に関わるアイテムはいずれも重要であるといえよう。

このことは、調査結果の統計、特に多変量解析では、その物理的・工学的意味を考慮してアイテムの組合せを変えたり、結果の解釈をおこなう必要があるといえよう。

### 5.6 今後の地震被害予測および震度判定の可能性

いつ地震が起こり、その震央がどこかということをつわらない。しかし近い将来において動く可能性のある活断層が同定されたとすると、震央に関するアイテムを取り去った結果から論議できる。

すなわち被害を受易いため池は同じ土性ならば、(1) 断層に近い (震度7クラスなら1 km以内) もの、(2) 断層に対して斜交、あるいは正対、直交しているもの、(3) 堤高が高く、堤長が長いもの、(4) 複雑な軸 (多軸) を持つもの、(5) 砂又は粘土地盤に建設されたものである。さらに、北淡町の結果を援用するならば (Fujii et al., 2000b), (6) 連続した池の上池、(7) 100年以上前に建設されたもの、(8) 堅硬な地盤までが深いものである。

また、本論には取り上げていないが (2.2項参照)、土質特性をアイテムとして用いれば、予測精度はさらに増す筈である。すなわち、このことについて藤井は、土質特性を加味した多変量解析 (現地調査の約80箇所; 被害・無被害略同数) をおこなった結果、判別の中率95%以上、確率的判別の中率 (被害・無被害同数の場合の50% : (4)式参照) に対する相対精度2.0に近い値を得ている (藤井他, 2004a)。

震央距離のカテゴリースコア (4.3 (2) 項) および最近断層の分析結果 (4.3 (3) 項) のように、ため池被害の大きい地帯は、震度7地帯と一致していた。このことは、逆に、ため池被害の分析からも、震度が推定できることを意味する。

## 6. おわりに

1995年1月17日の兵庫県南部地震による淡路島の北部5町のため池(ため池堤体)に被害を与える要因を明らかにしようとした。被害ため池350個、無被害ため池1438個を同定し、多変量解析(数量化理論Ⅱ類)および単変量解析をおこなった。ため池の位置、ダムサイトの地質、ため池の構造、ため池の履歴について、11アイテム、136および100カテゴリ要因を仮定したモデルを作成した。その結果次のような知見が得られた。

1. 分析の精度を知る指標として確率的判別の中率・相対精度を定義し算定した。360表示解析の、相関比は0.206、重相関係数は0.45、判別の中率は73.5%、確率的判別の中率(68.5%)に対する相対精度は1.08であった。データ数を考えれば信頼でき、このモデル(要因の設定を含め)は妥当といえる。

2. 偏相関係数から、被害に影響するのは、当然ながらため池の位置(震央距離; 1位, 最近断層名; 2位, 最近断層距離; 6位)に関するものであるが、ため池の構造(堤体量; 3位, 震央角度; 4位, 最近断層角度; 5位)も大きい。そして、ダムサイトの標高, 堤軸の平面形状, 表層地盤の地質特性と続く。ため池の履歴(地震前の漏水, そして地震前の修復)に関する要因の影響は小さい。

3. 震央距離がカテゴリースコア・被害率は18km未満が被害側となる。ただし、被害率ではわからないが、多変量解析では9km以上15km未満の区間の被害が最大であることが明確になり、気象庁発表の震度7地帯と一致する。

4. 最近断層が、野島・水越・D2断層の被害が大きく、距離が750m以内が被害を受易い。野島断層に限れば、断層に近いほど被害が大きい。

5. 堤軸が震央に対しほぼ正対しているもの、

直交のもの被害が大きく、断層に対してもこれに準ずる。そして、池が裏側(「震央」-「堤体」-「貯水池)の堤体の被害が大きい。更に、ため池堤体の体積が大きい程(堤高が高く、堤長が長い程)被害を受易く、多軸のため池や、表層地質が土質地盤上に築かれたため池が被害を受易い。

6. 各カテゴリの被害率とカテゴリースコアの傾向が一致しないもの(震央距離・最近断層・標高・表層地質・地震前の改修)がある。これらは単変量解析では誤った解釈をすることになる。

7. 5町領域(180度表示: 1788個)と北淡町(509個)の結果を比べると、判別の中率は北淡町と同じ(73.5%)だが、確率的判別の中率に対する相対精度は下がる。相関比, 重相関係数も北淡町に劣る。北淡町で低かった震央距離の偏相関係数が5町領域では最高位となり、震央距離が被害に最も影響する。ただし、カテゴリースコアの傾向は両領域共一致し10km付近が最大になる。最近断層は北淡町同様重要な要因だが、野島断層よりD2断層の影響が強くなる。最近断層距離の重要度は下がるが、被害の範囲はほぼ同じである。ただし断層直上付近の被害は5町領域の方が大きい。また最近断層角度・震央角度について北淡町で顕著に見られた45度付近のピークは見られなくなる。これは広領域になって野島断層の影響が少なくなったと考えられる。その他非地震関連のアイテムは、被害に影響する順位は多少変動するが、カテゴリの傾向(例えば堤体量が大きいほど被害が大きい)はほぼ一致していた。また、360度表示の解析から、北淡町では無視していた震央・断層に対する堤体-池の位置関係が重要であることがわかった。

8. 兵庫県南部地震のような近地(境界内)地震については必須な要因は、あるため池からの最近断層, その距離, その角度等の位置共に、震央に関するアイテムも又重要である。両者は影響しあい、かつ独立して影響する。一方ため池の被害分析から、震度分布の予測および今後の被害の有無の予測がある程度可能であることを示した。



## 謝 辞

最後に資料の供与の便宜をおはかり頂いた、兵庫県、北淡町他関係各位、貴重な文献を頂いたり御助言を賜った京都大学の岡田教授、神戸大学の内田教授、高知大学の篠教授、農業工学研究所の谷博士、株式会社フジタの池見博士、中村博士、東京大学地震研究所の宮武助教に対して心から謝意を表す。また多変量解析に関する助言と文献を頂いた岡山大学の垂水教授、田中教授に感謝する。また、適切なご意見をいただいたパーデュウ大学名誉教授 A. G. アルシャフ教授に深甚の謝意を表す。

さらに、現地調査、データの整理に多大の助力を賜った国政華奈、横溝隆之君はじめ、平成 8～10 年度の岡山大学農学部農業造構研究室の卒業生諸君に心から謝意を表す。

この研究の一部に文部省科学研究費、ならびにウエスコ学術基金の援助を受けたことを謝する。

## 参考文献

- 秋葉満寿次・仙波秀男：秋田県男鹿地震と溜池被害、農業土木研究, 1, pp.31-59, 1941.
- 電力土木技術協会：改訂新版最新フィルダム工学, 電力土木技術協会, 1981.
- 藤井弘章他：兵庫県南部地震による北淡町のため池の多変量解析, 自然災害学会講演会講演概要集, 1996
- 藤井弘章他：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
- 藤井弘章他：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
- 藤井弘章他：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
- 藤井弘章他：兵庫県南部地震によるため池被害の要因分析—主として土性について, 自然災害学会講演会講演概要集, 1998b
- 藤井弘章他：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, 自然災害学会講演会講演概要集, pp.67-68, 1999a
- 藤井弘章他：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
- 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 30 回地盤工学会研究発表会講演集, pp.2327-2329, 2000a
- Fujii, H. et al.: Damage factors for small embankment dams due to the Hyogoken-Nambu earthquake - Case study on Hokudan, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 6, pp.117-131, 2000b
- 藤井弘章, 国政華奈, 難波明代, 横溝隆之, 西村伸一, 島田清他：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：兵庫県南部地震による被害・無被害ため池の土性等の比較, 農業土木学会中国四国支部講演会講演集, 2003
- 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・無被害要因分析, 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野島断層付近のため池被害の多変量解析, 農業土木学会大会講演会講演集, 2004b
- Hasegawa, T. and Murakami, A: Damage to agricultural facilities, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, pp.255-261, 1996
- 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(1/10000), 1977b
- 兵庫県：被害ため池台帳, 1995a
- 兵庫県：被害ため池台帳位置図(1/10000), 1995b
- 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
- 北淡町：土地台帳, 1891
- 北淡町：被害ため池台帳, 1995a
- 北淡町：被害状況図, 1995b
- 池見拓, 中村正博：農業用ため池の地震被害の統計的予測, フジタ工業技術研究所報, 25, pp.7-12, 1989
- 池見拓：ため池堤体の地震危険度評価に関する統計的研究, 京都大学学位論文, pp.1-181, 1993
- 市原松平・山田公夫：地震時における名古屋市水道管の相対的危険度, 土木学会論文報告集, 316, p.p.51-63, 1981

- 市原松平・山田公夫：想定地震による名古屋市の木造家屋の被害予測，土木学会論文報告集，340，pp.145-154，1983
- 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，1991
- 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一，気象庁技術報告，No.119，1997
- 国土地理院編：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都市圏活断層図，IX近畿圏西部地区，1996
- 国土地理院：成果表，1997
- 久保慶三郎：土木構造物の震害予測，土と基礎，(31)5，pp.7-13，1983
- 高知大学農学部震災調査グループ：兵庫県南部地震淡路島における震災調査報告，1996
- Matsumoto, N., Nakamura, A., Sasaki, T. and Iwashita, T.: Effects on dams, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp.273-281, 1996
- 守谷正博・高岡恭三・山下進：十勝沖地震によるアースダムの被害調査とその考察，土と基礎，541，pp.39-45，1968
- 守谷正博：地震によるアースダムの被害について，大ダム，41，pp.37-95，1968
- Miyatake, T. and Inoue T.: Simulation of earthquake rupture processes and strong ground motion, ACES Inaugural workshop, Brisbane & Noosa, QLD pp.255-259, 1999
- 岡田勝也・福島弘文：地震時における橋台裏盛土の沈下量評価手法の提案，土木学会論文集，418，pp.249-255，1990
- 菅民郎：多変量解析の実践，現代数学社，1993
- 鈴木健一・福田一美・中村正博・池見拓：悉皆調査に基づく農業用ため池の地震被害の予測，土木学会論文集，441，pp.67-76，1992
- 高瀬国雄，天野充，山下進：地震によるアースダムの被害，土と基礎，(14)10，pp.3-9，1966
- 田中豊，垂水共之：多変量解析ハンドブック，共立出版，1997
- 谷茂，長谷川高士：日本海中部地震を中心とした溜池の地震被害，農業土木学会誌，(55)10，pp.17-25，1987
- 谷茂，長谷川高士：溜池の地震時安全性の評価法，農業土木学会論文集，152，pp.55-64，1991
- Tani, S.: Damage to earth dams, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Soils and Foundations, pp.263-, 1996
- 垂水共之：新版 SPSSx 解析編 2，東洋新報社，1995
- 地質調査所：明石地の地質，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
- 辻誠一：兵庫県南部地震によるため池被害について，材料施工研究部会報，34，農業土木学会材料施工研究部会，1996
- 東京天文台：理科年表，1998
- 上田太郎，荻田正雄，本田和恵：Excel 徹底活用多変量解析，秀和システム，2003
- USBR: Design of Small Dams, US Government Printing Office, 1960
- 山崎晃，三宅克之，中村正博，池見拓：農業用溜池の地震時における被害予測，農業土木学会誌，(55)6，pp.543-550，1987
- 山崎晃，三宅克之，中村正博，池見拓：ため池の地震被害の分析，土木学会論文集，404/I-2，pp.361-366，1989
- 山田公夫：想定地震による名古屋市沖積地盤の液状化予測，土木学会論文集，455，pp.37-45，1992

(投稿受理：平成16年9月27日  
訂正稿受理：平成17年1月4日)