ダム貯水と地震活動 (第 3 報)

——日本の大ダムについての統計的検定 (1)——

神戸大学理学部地球科学教室* 寺島 敦・神谷 郁代**

(昭和 63 年 3 月 7 日受付; 平成 1 年 1 月 9 日受理)

Induced Seismicity and Dam Reservoirs (III)

——Statistical Test for Main Dams in Japan (I)——

Tsutomu TERASHIMA and Ikuyo KOYA

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kobe University, Rokkodai-machi 1-1,
Nada-ku, Kobe-shi, 657

(Received March 7, 1988; Accepted January 9, 1989)

The seismological data of JMA (Japan Meteorological Agency) make epochs at 1961 and 1976. The detectability of seismic events improved from each epoch, and especially it rose remarkably from the latter epoch. Moreover, the result of reexamination of the seismological data for the period 1926–1960 by JMA, shows that the yearly frequency of seismic events in the period rose almost equal to the yearly frequency found during the period 1961–1975. The yearly frequency of events of $M \geq 3.5$ after 1976 is almost equal to that of events for the period 1961–1975, too. Therefore, if the events of $M < 3.5$ after 1976 are eliminated from the data, it is possible to consider as the seismological data are almost homogeneous throughout the period 1926–1982. This means that it is possible to analyze seismicity quantitatively. The new seismic data are available for the statistical test of time-spatial change of seismicity around the dam areas effected by impoundment.

The present paper is a revision of the previous paper [TERASHIMA (1983)] surveyed qualitatively the seismicity change between pre- and post- impoundment for the 43 dam areas, and the revision was done by applying a hypothesis test for the new seismic data of the same dam areas surveyed in the previous paper.

The hypothesis test is done for the significant difference between the yearly frequency of seismic events from 1926 to the start of impoundment for each dam and the seismicity index that is defined here by the yearly mean frequency of seismic events for 5 years after the start of impoundment for each dam.

The significant difference is detected in 20 dam areas. In the following 6 dam areas of them, that is, Kurobe, Nagawado, Kusaki, Hitotsuse, Kuzuryu and Midono, it is estimated that the significant differences are caused by the seismicity induced by the impoundment, taking a time series of seismicity around the each dam into consideration.

It is concluded that the seismicity of Kusaki dam area became quiescent after the impoundment and it of the other 5 dam areas did active after the impoundment.

In the remaining 23 dam areas, no significant difference is recognized by the statistical test. They show also no change between the actual seismicities before and after impoundment.

There are some differences in the results between the present paper and the previous one. The causes come from:

- (i) use of the new seismic data for the period 1926–1982 in the present paper,
- (ii) use of the seismicity in epicentral distance $\Delta \leq 30$ km centering around each dam in the

present paper, but $\Delta \leq 50$ km in the previous one,

(iii) application of the statistical test for the standards of objective and quantitative judgment in the present paper, but only qualitative in the previous one, and

(iv) use of the started date of impoundment in the present paper instead of the date of completion of dams in the previous paper, for the date to divide the seismicity into two groups, before and after the impoundment (There are usually the difference of 1 to 2 years between the started date of impoundment and the date of completion of dams).

§ 1. 緒 言

日本のダム貯水とその前後におけるダム近傍の地震活動の変化とに関する研究は寺島 (1983) 及び OHTAKE (1986) による報告がある。

寺島 (1983) は地震資料の均質性を保つため、「地震月報」[気象庁 (1926~1980・10月)] の質が改善された 1961 年以降に完成した大ダム (堤高 80 m 以上) について定性的に調査した。

OHTAKE (1986) は、地震資料の均質性を考慮する必要のない巧妙な手法を開発して、1961 年以前に完成したダムについても調査を行った。

本研究は、1926 年から 1960 年までの、震源要素の再決定による新しい地震資料 [気象庁 (1982)] を用い、寺島 (1983) の結果を統計的手法と加味して再検討し、更に OHTAKE (1986) の結果との比較検討を行なったものである。

§ 2. 地震資料

本研究に使用した地震資料は 1926 年から 1982 年 2 月までである。このうち、1926 年から 1960 年までは新しい地震資料 [気象庁 (1982)] を用い、1961 年から

Fig. 1. Variation of the yearly frequency of earthquakes reported by JMA (Japan Meteorological Agency) during 1926-1982. The dotted line shows the frequency of earthquakes reported on the catalogue of relocated major earthquakes in and near Japan (1926-1960). The dashed line shows the frequency of earthquakes greater than or equal to magnitude 3.5.

1982 年 2 月までは「地震月報」[気象庁 (1961~1982・2月)] を用いた。

ダムによる誘発地震を調べるには、貯水前後の地震活動を比較する必要があるため、長期間にわたり地震資料の質が一樣でなければならない。

地震月報 [気象庁 (1926~1982・2月)] に記載されている地震の数は、電算機の導入により 1961 年から、また高感度地震計の設置と震源決定プログラムの改良とで 1976 年以降飛躍的に増加した [市川 (1982)] (Fig. 1 の実線参照)。

1926 年から 1960 年に発生した地震の震源再調査をした「地震月報別冊第 6 号」[気象庁 (1982)] の記載地震数は、同期間の「地震月報」[気象庁 (1926~1960)] と比較して約 3 倍に増加している (Fig. 1 の点線)。1976 年以降について、 $M \geq 3.5$ の各年の地震数は Fig. 1 の破線のようになる。

Fig. 1 で、1926 年から 1960 年までの点線、1961 年から 1975 年までの実線、1976 年以降の破線を見ると、1926 年以降ほぼ一様な地震発生頻度を示しているとみてよい。従って、本研究で用いる地震資料は、1926 年から 1960 年までは「地震月報別冊第 6 号」[気象庁 (1982)] のすべて、1961 年から 1975 年までは「地震月報」[気象庁 (1961~1975)] のすべて、1976 年以降については「地震月報」[気象庁 (1976~1982・2月)] 中の $M \geq 3.5$ のみの地震とした。

§ 3. ダム資料

調査対象としたダム地域は寺島 (1983) と同じ 43 ヶ所のダム地域である。それらのダム名、堤高、位置、貯水年月日、最大貯水量、最大貯水面積を Table 1 に、その位置を本研究の結果と共に Fig. 13 に再記載した。Table 1 で、寺島 (1983) はダム完成年月日を用いているが、本研究では貯水開始年月日に変更した。

§ 4. 調査・検定方法

ダム貯水により誘発されると考えられる地震活動は震央距離 25 km 以内に限定されている [SIMPSON (1976)] と言われている。また LEE (1972) が Gordon 湖 (Tasmania) で行った地殻変形の計算によると、貯水による荷重

Table 1. Height, location, the start of impoundment, pondage and storage area of each dam.

NO.	DAM	HEIGHT (m)	LOCATION (°E)	(°N)	THE START OF IMPOUNDMENT	PONDAGE ($\times 1000\text{m}^3$)	STORAGE AREA (km^2)
1	KUROBE	186.0	137.67	36.56	1960 OCT	199285	3.49
2	NAGAWADO	155.0	137.73	36.14	1969 MAR	123000	2.74
3	KUSAKI	140.0	139.38	36.54	1976 MAR	60500	1.70
4	TAKANE DAIICHI	133.0	137.50	36.03	1968 FEB	45800	1.20
5	YAGISAWA	131.0	139.06	36.92	1965 SEP	204300	5.67
6	HITOTSUSE	130.0	131.31	32.20	1963 APR	261315	6.86
7	SHIMOKUBO	129.0	139.03	36.13	1967 NOV	130000	3.27
8	KUZURYU	128.0	136.69	35.89	1967 DEC	353000	8.90
9	KAWAMATA	120.0	139.53	36.86	1963 OCT	87600	2.59
10	SHIMOKOJIMA	119.0	137.03	36.24	1973 MAR	117440	2.69
11	TSURUTA	117.5	130.49	31.91	1964 NOV	123000	3.61
12	SHIN TOYONE	116.5	137.75	35.13	1972 SEP	53500	1.56
13	YANASE	115.0	134.11	33.58	1965 FEB	104630	2.91
14	IKEHARA	111.0	135.97	34.38	1964 JUN	338400	8.43
15	KAJIGAWA	106.5	139.49	37.82	1974 OCT	22500	0.60
16	SAMEURA	106.0	133.55	33.76	1971 NOV	316000	7.50
17	MISAKUBO	105.0	137.87	35.15	1969 APR	30000	0.84
18	KOSHIBU	105.0	137.98	35.60	1968 JUL	58000	1.67
19	SHIN NARIWAGAWA	103.0	133.40	34.82	1968 JUN	127500	3.60
20	NIKAPPU	102.8	142.57	42.64	1974 FEB	145000	4.35
21	HOUHEIKYO	102.5	141.16	42.92	1972 MAR	47100	1.50
22	TOURI	101.0	136.81	36.47	1965 DEC	31400	1.03
23	YAHAGI	100.0	137.42	35.23	1970 MAR	80000	2.70
24	SHIMOUKE	98.0	130.99	33.19	1969 MAR	55950	2.00
25	KUROKAWA	97.5	134.89	35.21	1973 NOV	33387	1.09
26	MIDONO	95.5	137.75	36.15	1969 AUG	15100	0.57
27	KISENYAMA	95.0	135.87	34.90	1969 MAR	7230	0.30
28	OHSHIRAKAWA	95.0	136.83	36.14	1963 OCT	14200	0.67
29	ABUGAWA	95.0	131.50	34.36	1974 SEP	153500	4.00
30	YUDA	87.5	140.89	39.30	1963 NOV	114160	6.30
31	SUGANO	87.0	131.90	34.14	1965 JUL	95000	3.02
32	ISHITEGAWA	87.0	132.84	33.87	1972 MAY	12800	0.50
33	TAISETSU	86.5	143.05	43.67	1975 OCT	66000	2.92
34	MATSUKAWA	84.5	137.78	35.57	1974 MAR	7400	0.29
35	MATSUBARA	83.0	130.99	33.23	1970 DEC	54600	1.90
36	OHTORI	83.0	139.22	37.22	1963 OCT	15800	0.89
37	SUSOHANA	83.0	138.13	36.66	1969 MAR	15000	0.58
38	UCHINOKURA	82.5	139.44	37.84	1972 DEC	24800	1.00
39	KUROMATAGAWA DAINI	82.5	139.13	37.27	1963 NOV	60000	2.25
40	SHOHRENJI	82.0	136.12	34.59	1970 JAN	27200	1.04
41	ABURATANI	82.0	130.70	32.43	1975 DEC	5420	0.23
42	YOKOYAMA	80.8	136.46	35.59	1964 FEB	43000	1.70
43	AMEHATA	80.5	138.33	35.41	1966 DEC	13700	5.46

の影響は深さ 50 km, 水平方向 14 km で, 荷重直下の約 2%程度であると言う。これらのことを考慮して, 本研究では § 2 の地震資料のうち, ダムを中心とした半径 30 km の半球内の地震活動を対象とする。

ダム貯水による地震活動は, 貯水位との相関よりも貯水位の急激な変動に, より高い相関をもつ [寺島・松本 (1984)]. このような急激な変動は貯水直後に起る可能性が高い。また, 貯水後のダム近傍での地震活動を, 即ダム貯水に責任をゆだねられるものではない。すなわち, ダム貯水の存否に関係なく発生した地震活動かも知れない。この地震活動がダム貯水によるものかどうかの判定は現状では不可能で, ただダム貯水による疑いが濃

いと言えるだけである。従って, ダム貯水後 15~20 年以上も後にダム近傍で発生した地震までをダム貯水に結び付けることは危険である。世界の大ダムでも誘発地震と言われるのは, ほとんどが 10 年以内に発生している [SIMPSON (1976)]. 唯一の例外は貯水 17 年後より現在も地震活動を続けているエジプトのアスワン・ハイ・ダムのみであろう。この地震活動の最終的な結論は未だでていない。ダム貯水と地震活動との関係を調べるには, ダム貯水に関係の薄いと思われる地震活動, すなわち雑音を排除するために, ダム貯水後のある期間に限った地震活動に注目する必要がある。

日本のダムは世界のダムに比較してその規模が小さい

Fig. 2. Occurrence time and magnitude of earthquakes which occurred within 50 km around Nagawado dam (No. 2) during five years before and after the start of impoundment. An arrow shows the start of the impoundment. Ordinate shows focal distance from the dam.

Fig. 3. Three dimensional illustration of seismicity within 50 km around Nagawado dam. The left and right side figures show the seismicity during five years before and after the start of impoundment, respectively.

こと、また本研究の目的が寺島(1983)の結果の再検討ということから、貯水後5年間の地震活動と貯水前の地震活動との対比を試みることにする。

まず、貯水前後の地震活動の変化を調べるために、次の作図作業をダムごとに行った。

作業1: ダムを中心にして半径 50 km の半球内に発生した地震のうち、貯水開始時を基準として、その前後各5年間の地震活動を震源距離、規模、発生時で表示した図 (Fig. 2 参照)。

作業2: ダムを中心にして半径 50 km の半球内に発生した地震を、貯水前5年間と貯水後5年間について、その震央分布図と東西・南北両断面に投影した震源分布図 (Fig. 3 参照)。

作業3: ダムを中心にして半径 50 km の半球内に発生した地震の震源距離、各年ごとの発生頻度及び放出エ

Fig. 4. Released energy and frequency distribution of earthquakes with hypocentral distances in each year within 50 km around Nagawado dam. An arrow shows the start of the impoundment. Dots are marked at the distance equal to the focal distances from the dam.

ネルギーの図 (Fig. 4 参照)。

調査対象とする地域はダムから半径 30 km の半球内であるが、これらの作図作業では、より広範囲の地震活動と調査範囲外で発生した地震の余震域や群発地震の発生域が調査範囲内にかかっている状態をみるために半径 50 km の半球について行った。

作業1の図から、ダム近傍での、ダム貯水直前直後の地震活動の時間的推移を知ることができる。

作業2の図から、ダム近傍での、ダム貯水直前直後の地震活動の変化をダムから見た方位と距離とで知ることができる。

作業3の図から、ダム近傍での地震活動の長期的変化を知ることができる。

作業1と2との図は、貯水直前直後にかけでの地震活動の短期的推移の判断に役立つ。また、作業3の図は、貯水前にどのような地震活動の履歴を持っているか、貯水後にそれがどう変化したかの長期的推移の判断に役立つ。

次に、各ダムから半径 30 km の半球内の地震活動について、地震活動は定常ポアソン過程に従う〔渡辺(1936)、石本・飯田(1939)〕ものと仮定し、貯水前後の変化を検定した。

Table 2. The main shocks and swarms which occurred within 30 km (left) and 50 km (right) around the dams.

DAM AND START OF IMPOUNDMENT	EPICENTRAL DISTANCE ≤ 30 KM	30 KM $<$ EPICENTRAL DISTANCE ≤ 50 KM
1 KUROBE ('60, OCT.)		MATSUSHIRO SWARM ('65, AUG. -)
2 NAGANADO ('69, MAR.)		MATSUSHIRO SWARM ('65, AUG. -)
3 KUSAKI ('76, MAR.)		SW NAGANO PREF SWARM ('78, OCT. -)
4 TAKANE DAICHI ('68, FEB.)		NISHI-SAITAMA EQ. ('31, SEP., M:6.9, 45KM)
5 YAGISAWA ('65, SEP.)		*INAICHI EQ. ('49, DEC., M:6.4, 36KM)
6 HITOTSUSE ('63, APR.)		CENTRAL Gifu PREF EQ. ('69, SEP., M:6.6, 47KM)
7 SHIMOKUBO ('67, NOV.)		N HYUGANADA EQ. ('39, MAR., M:6.6)
8 KUZURYU ('67, DEC.)		FUKUI EQ. ('48, JUN., M:7.3)
9 KAWAMATA ('63, OCT.)		CENTRAL Gifu PREF EQ. ('69, SEP., M:6.6, 36KM)
10 SHIMOKOJIMA ('73, MAR.)		*INAICHI EQ. ('49, DEC., M:6.4, 36KM)
11 TSURUTA ('64, NOV.)		KITAMINO EQ. ('61, AUG., M:7.0, 34KM)
12 SHIN TOYONE ('72, SEP.)		
13 YANASE ('65, FEB.)		*NANKAI EQ. ('46, DEC., M:8.1)
14 ICHIHARA ('64, JUN.)		KAWACHI-YAMATO EQ. ('36, FEB., M:6.4, 32KM)
15 KAJIGAWA ('74, OCT.)		NIIGATA EQ. ('64, JUN., M:7.5)
16 SAMEURA ('71, NOV.)		*NANKAI EQ. ('46, DEC., M:8.1)
17 MISAKUBO ('69, APR.)		SW NAGANO PREF SWARM ('78, OCT. -)
18 KOSHIBU ('68, JUL.)		
19 SHIN NARIWAGAWA ('68 JUN.)		
20 NIKAPPU ('74, FEB.)		
21 HOUHEIKYO ('72, MAR.)		
22 TOURU ('65, DEC.)		
23 YAHAGI ('70, MAR.)		
24 SHIMOUKE ('69, MAR.)		MIKAWA EQ. ('45, JAN., M:7.1)
25 KUROKAWA ('73, NOV.)		*CENTRAL OHITA PREF EQ. ('75, APR., M:6.4, 32KM)
26 MIDONO ('69, AUG.)		KITA-TANGO EQ. ('27, MAR., M:7.3, 42KM)
27 KISENYAMA ('69, MAR.)		SW NAGANO PREF SWARM ('78, OCT. -)
28 OHSHIRAKAWA ('63, OCT.)		('36, FEB., M:6.4, 37KM)
29 ABUGAMA ('74, SEP.)		FUKUI EQ. ('48, JUN., M:7.3)
30 YUDA ('63, NOV.)		CENTRAL Gifu PREF EQ. ('69, SEP., M:6.6, 44KM)
31 SUGANO ('65, JUL.)		
32 ISHITEGAWA ('72, MAY)		
33 TAISETSU ('75, OCT.)		
34 MATSUKAWA ('74, MAR.)		
35 MATSUBARA ('70, DEC.)		SW NAGANO PREF SWARM ('78, OCT. -)
36 OHTORI ('63, OCT.)		*CENTRAL OHITA PREF EQ. ('75, APR., M:6.4, 33KM)
37 SUSOHANA ('69, MAR.)		
38 UCHINOKURA ('72, DEC.)		
39 KUROMATAGAWA DAINI ('63, NOV.)		
40 SHOHRENJI ('70, JAN.)		NIIGATA EQ. ('64, JUN., M:7.5)
41 ABURATANI ('75, DEC.)		
42 YOKOYAMA ('64, FEB.)		EBINO EQ. ('68, FEB., M:5.7, 45KM)
43 AMEHATA ('66, DEC.)		FUKUI EQ. ('48, JUN., M:7.3)
		KITAMINO EQ. ('61, AUG., M:7.0)

* The earthquake that after shock area enter within 30km from the dam.

Table 3. The periods and areas of aftershocks excepted from the calculation, and their main shocks.

DAM	MAIN SHOCK					PERIOD AND AFTER SHOCK AREA EXCEPTED FROM THE DATA	
	NAME OF EQ.	DATE	M	°N	°E	PERIOD	AFTER SHOCK AREA
3 KUSAKI	IMAICHI EQ	DEC 26 '49	6.4	36.58	139.78	DEC '49 - DEC '50	36.50-36.70(°N) 139.51-139.72(°E)
7 SHIMOKUBO	NISHI-SAITAMA EQ	SEP 9 '31	6.9	36.14	139.23	SEP '31 - OCT '32	36.00-36.25 139.13-139.31
8 KUZURYU	KITAMINO EQ	AUG 8 '61	7.0	36.01	136.76	AUG '61 - OCT '62	35.86-36.13 136.58-136.81
	E FUKUI PREF EQ	AUG 31 '72	6.0	35.88	136.76	AUG '72 - FEB '73	35.84-35.89 136.75-136.82
9 KAWAMATA	IMAICHI EQ	DEC 26 '49	6.4	36.58	139.78	DEC '49 - DEC '50	36.56-36.78 139.61-139.80
11 TSURUTA	EBINO EQ	FEB 21 '68	5.7	32.01	130.71	FEB '68 - AUG '68	31.98-32.04 130.71-131.83
13 YANASE	NANKAI EQ	DEC 21 '46	8.1	33.00	135.60	DEC '46 - DEC '57	33.64-33.81 133.95-134.35
	S TOKUSHIMA PREF EQ	JUL 27 '55	6.4	33.73	134.31	JUL '55 - DEC '56	33.61-33.79 134.20-134.36
16 SAMEURA	NANKAI EQ	DEC 21 '46	8.1	33.00	135.60	DEC '46 - DEC '57	33.63-33.93 133.60-133.83
24 SHIMOUE	N MT.ASO EQ	JAN 23 '75	6.1	33.00	131.13	JAN '75 - DEC '75	32.95-33.05 131.03-131.14
	CENTRAL OHITA PREF EQ	APR 21 '75	6.4	33.13	131.33	APR '75 - DEC '75	33.20-33.25 131.28-131.33
28 OHSHIRAKAWA	KITAMINO EQ	AUG 19 '61	7.0	36.01	136.76	AUG '61 - OCT '62	35.95-36.20 136.58-136.79
30 YUDA	SW AKITA PREF EQ	OCT 16 '70	6.2	39.20	140.75	OCT '70 - OCT '71	39.14-39.29 140.71-140.78
35 MATSUBARA	N MT.ASO EQ	JAN 23 '75	6.1	33.00	131.13	JAN '75 - DEC '75	32.98-33.04 131.04-131.14
	CENTRAL OHITA PREF EQ	APR 21 '75	6.4	33.13	131.33	APR '75 - DEC '75	33.16-33.20 131.28-131.30
37 SUSOHANA	MATSUSHIRO SWARM	AUG - '65				AUG '65 - DEC '71	36.38-36.63 138.06-138.33
	NAGANO EQ	JUL 15 '41	6.1	36.71	131.23	JUL '41 - DEC '41	36.58-36.71 138.10-138.38

検定方法 [鷺尾 (1983)] は、貯水後 5 年間の地震活動の指標として、その年平均発生頻度で表し、それと 1926 年から各ダムの貯水直前までの年発生頻度の 95% 及び 99% の信頼区間との対比によって貯水後の地震活動の異常の検出を行なった。すなわち、貯水後 5 年間の年平均地震発生数を μ_0 とし、貯水前各年の地震発生数 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ から t 検定により

$$|\sqrt{n}(\bar{X} - \mu_0)/S| \geq t(n-1, \alpha)$$

で棄却検定をした。ここで、 $\bar{X} = (\sum X_i)/n$, S^2 は標本分散である。

μ_0 が、その 95% 信頼区間未満に属せば “有意差なし”。換言すれば、貯水前後で地震活動に変化が認められないと判定した。同様に、 μ_0 が、貯水前の年発生頻度の 95% 以上と 99% 未満とにある場合、“有意差あり” と判定した。すなわち、貯水前に比べて貯水後の地震活動が有意に変化したと判定した。更に、 μ_0 が、貯水前の年発生頻度の 99% 信頼区間以上の場合、貯水後の地震活動が、貯水前に比べて “極めて有意” に変化したと判定した。

ダム貯水前の地震活動を統計処理する場合、

- ① 調査域内に発生した顕著な地震の余震群、
- ② 調査域外に発生した顕著な地震の余震群のうち、調査域にかかっている余震群、
- ③ 調査域内及び調査域にかかる群発地震群は、統計処理上の雑音となるので除く必要がある。Table 2 に、ダム近傍で発生した顕著な地震と群発地震とを、関連するダム名と共に示した。

この雑音除去について OHTAKE (1986) が行っている方法は、統計的結果を個々の事象に適用しているので議論の余地を残している。従って、そのまま踏襲するのは適当とは思えない。

本調査での雑音除去は、調査域に関与する個々の余震群・群発地震について、その時空分布から、その活動地

域と地震活動がほぼ定常に復帰するまでの期間を判定し、統計処理の対象から除外する手法で行った。このようにして除外した地震・期間・区域を関連するダム名と共に Table 3 に示した。ただし、作業 1, 2, 3 で作成した図にはすべての地震を用いている。

各ダムの貯水前後の地震活動の変化を統計的処理によって調査する場合、もし、貯水の少し前 (例えば 1~3 年前) より地震活動が活発化しているならば、統計処理では貯水後地震活動が活発化したという結果を得る。また逆に、貯水少し前より地震活動が沈静化しているならば、統計処理の結果は貯水後地震活動が沈静化したことになる。従って、統計処理の結果のみでダム貯水による地震活動の変化を機械的に処理することは誤った結果を導く恐れがある。

本研究では、統計的検定結果に前述の作業 1, 2, 3 によって得られた地震活動の図を照合して、ダム貯水と地震活動の変化との相関について最終的な判定を行なった。

§ 5. 検定結果

Table 4 は検定結果で、各ダム近傍 (震源距離 ≤ 30 km) の貯水前の地震発生数及び年平均発生頻度、貯水後 5 年間の地震発生数及び年平均発生頻度、貯水前の年発生頻度の 95% 及び 99% の信頼区間を示してある。

Table 4 から、貯水後のダム近傍の地震活動を以下の 4 種に分類できる。

- [I] 極めて有意に活発化したダム (8 ダム): ① 黒部, ② 奈川渡, ④ 高根第一, ⑥ 一ツ瀬, ⑧ 九頭竜, ⑮ 加治川, ⑳ 水殿, ㉑ 阿武川,
- [II] 変化のみられなかったダム (23 ダム): ⑤ 矢木沢, ⑦ 下久保, ⑪ 鶴田, ⑬ 魚梁瀬, ⑯ 早明浦, ⑰ 水窪, ⑲ 新成羽川, ㉒ 豊平峽, ㉔ 刀利, ㉕ 矢作, ㉖ 下笠, ㉗ 喜撰山, ㉘ 大白川,

Table 4. The result of statistical test for seismicity variance before and after the impoundment.

1st and 2nd columns: Number of earthquakes and mean frequency per year of the both periods of 1926 to the impounding date and 5 years after that date. Number in parenthesis shows mean frequency per year.

3rd column: Standard deviation of the seismicity for 5 years after the impoundment.

4th and 5th columns: Confidence interval for yearly frequency before the impounding date at the 95% confidence level.

6th and 7th columns: Confidence interval for yearly frequency before the impounding date at the 99% confidence level.

Single and double asterisks of the right side show that seismicities around the dams before and after the impoundment point out significant difference at the 95% and 99% confidence levels, respectively.

NO	DAM	NO. OF EARTHQUAKES		STANDARD DEVIATION	CONFIDENCE INTERVAL			
		BEFORE	AFTER		95%		99%	
1	KUROBE	27(0.76)	11(2.20)	2.57	0.48	1.04	0.40	1.12 **
2	NAGAWADO	44(1.02)	11(2.20)	2.17	0.73	1.32	0.63	1.42 **
3	KUSAKI	113(2.25)	1(0.20)	0.40	1.84	2.66	1.71	2.79 **
4	TAKANE DAIICHI	36(0.86)	9(1.80)	2.14	0.58	1.14	0.50	1.22 **
5	YAGISAWA	13(0.33)	2(0.40)	0.80	0.16	0.50	0.10	0.56 -
6	HITOTSUSE	9(0.24)	4(0.80)	0.40	0.08	0.40	0.03	0.45 **
7	SHIMOKUBO	47(1.12)	4(0.80)	0.63	0.79	1.44	0.70	1.53 -
8	KUZURYU	37(0.88)	10(2.00)	2.64	0.60	1.16	0.51	1.25 **
9	KAWAMATA	69(1.83)	4(0.80)	0.75	1.41	2.25	1.28	2.38 **
10	SHIMOKOJIMA	17(0.35)	0(0.00)	0.00	0.18	0.51	0.13	0.57 **
11	TSURUTA	9(0.22)	1(0.20)	0.40	0.08	0.36	0.03	0.41 -
12	SHIN TOYONE	47(1.00)	2(0.40)	0.49	0.72	1.28	0.63	1.37 **
13	YANASE	47(1.21)	4(0.80)	0.80	0.77	1.49	0.69	1.84 -
14	IKEHARA	24(0.62)	0(0.00)	0.00	0.38	0.86	0.30	0.94 **
15	KAJIGAWA	8(0.16)	2(0.40)	0.49	0.05	0.27	0.01	0.31 **
16	SAMEURA	30(0.65)	3(0.60)	0.80	0.45	0.76	0.40	0.81 -
17	MISAKUBO	46(1.07)	4(0.80)	0.98	0.76	1.38	0.67	1.47 -
18	KOSHIBU	19(0.45)	1(0.20)	0.40	0.25	0.65	0.19	0.71 *
19	SHIN NARIWAGAWA	9(0.21)	1(0.20)	0.40	0.07	0.35	0.03	0.39 -
20	NIKAPPU	7(0.14)	0(0.00)	0.00	0.04	0.24	0.002	0.28 **
21	HOUHEIKYO	0(0.00)	0(0.00)	0.00	-	-	-	-
22	TOURI	7(0.17)	1(0.20)	0.40	0.04	0.30	0.004	0.35 -
23	YAHAGI	31(0.70)	4(0.80)	1.10	0.46	0.94	0.38	1.02 -
24	SHIMOUKE	50(1.15)	7(1.40)	0.49	0.84	1.46	0.75	1.55 -
25	KUROKAWA	17(0.37)	0(0.00)	0.00	0.20	0.54	0.15	0.59 **
26	MIDONO	48(1.09)	11(2.20)	2.99	0.78	1.40	0.68	1.50 **
27	KISENYAMA	57(1.31)	7(1.40)	1.10	0.98	1.64	0.87	1.75 -
28	OHSHIRAKAWA	22(0.58)	2(0.40)	1.20	0.34	0.72	0.26	0.90 -
29	ABUGAWA	4(0.08)	3(0.60)	0.80	0.002	0.16	0.00	0.18 **
30	YUDA	8(0.20)	1(0.20)	0.49	0.06	0.34	0.02	0.38 -
31	SUGANO	2(0.05)	0(0.00)	0.00	0.00	0.12	0.00	0.14 -
32	ISHITEGAWA	12(0.27)	0(0.00)	0.00	0.12	0.42	0.07	0.46 **
33	TAISETSU	1(0.02)	0(0.00)	0.00	0.00	0.26	0.00	0.07 -
34	MATSUKAWA	8(0.16)	0(0.00)	0.00	0.05	0.27	0.01	0.31 **
35	MATSUBARA	46(1.02)	5(1.00)	0.49	0.73	1.31	0.64	1.40 -
36	OHTORI	16(0.42)	1(0.20)	0.40	0.21	0.63	0.15	0.69 *
37	SUSOHANA	50(1.16)	5(1.00)	0.63	0.84	1.48	0.74	1.58 -
38	UCHINOKURA	7(0.14)	0(0.00)	0.00	0.00	0.89	0.00	1.13 -
39	KUROMATAGAWA DAIJI	13(0.34)	2(0.40)	0.40	0.15	0.53	0.10	0.58 -
40	SHOHRENJI	14(0.31)	2(0.40)	0.40	0.15	0.47	0.10	0.52 -
41	ABURATANI	27(0.55)	2(0.40)	0.49	0.34	0.76	0.28	0.82 -
42	YOKOYAMA	56(1.46)	4(0.80)	0.75	1.08	1.84	0.96	1.96 **
43	AMEHATA	54(1.33)	7(1.40)	1.47	0.98	1.68	0.87	1.79 -

** : VERY SIGNIFICANT (THE 99% CONFIDENCE LEVEL)

* : SIGNIFICANT (THE 95% CONFIDENCE LEVEL)

- : NOT SIGNIFICANT

③⑩ 湯田, ③① 菅野, ③② 大雪, ③⑤ 松原, ③⑦ 裾花,
③⑧ 内ノ倉, ③⑨ 黒又川第二, ④⑩ 青蓮寺, ④① 油
谷, ④③ 両畑,

[Ⅲ] 有意に沈静化したダム (2 ダム): ①⑧ 小渋, ③⑥
大島,

[Ⅳ] 極めて有意に沈静化したダム (10 ダム): ③ 草
木, ⑨ 川俣, ⑩ 下小島, ⑫ 新豊根, ⑭ 池原,
⑳ 新冠, ㉕ 黒川, ㉚ 石手川, ㉜ 松川, ㉞ 横
山,

この検定結果に, § 4 で各ダムについて作成した 3 種

Fig. 5. Same as Fig. 2, but around Takane Daiichi dam (No. 4).

の図を照合し、検定結果、ダム貯水及びダム近傍の地震活動との調和性を § 6, § 7 で吟味する。

§ 6. 地震活動が極めて有意に活発化したダム地域

検定結果から、貯水により極めて有意に地震活動が活発化したのは上記 8 ダム地域である。これらの地域に § 4 の作業 1, 2, 3 で作成した 3 種の図で、ダム貯水による地震活動の推移を吟味した結果、

[A] 貯水により地震活動が活発化したと思われるダム：① 黒部、② 奈川渡、⑥ 一ツ瀬、⑧ 九頭竜、⑫ 水殿、

[B] 貯水後の地震活動の活発化が貯水によると思われるダム：④ 高根第一、⑮ 加治川、⑲ 阿武川、

の二つのグループに分けられる。

グループ A に属するダム地域では、貯水後明らかに地震活動が活発化しているのが作業 1 の図から認められる。しかし、グループ B に属するダム地域では、貯水直前より地震活動が活発化しており、検定結果で“極めて有意”であっても、これらの地震活動をダム貯水による活動とは見なせない。このように、ダム貯水直前より続く地震活動の場合、ダム貯水と地震活動との相関を統計処理のみで判断するのは危険である。

Fig. 2, 3, 4 はグループ A の例で、② 奈川渡ダムについて § 4 の作業 1, 2, 3 で得られた地震活動の図である。これらの図から分かるように、1926 年以来、ダム地点より 10 km 以内には全く地震が発生していないが、貯水直後より活発化しているのが認められる。グループ A に属する他のダムも、ほぼ類似の地震活動の形態を示している。

Fig. 5, 6 はグループ B の例で、④ 高根第一ダムについて § 4 の作業 1, 2 で得られた地震活動の図である。明らかに地震活動は貯水前より活発化している。且つ、グループ B に属するダム地域では、ダムから至近距離 ($\Delta \leq 10$ km) で地震が発生していない。従って、検定結果は

Fig. 6. Same as Fig. 3, but around Takane Daiichi dam (No. 4).

震源距離 20~30 km の地震活動によって影響されたものと考えられる。検定は $\Delta \leq 30$ km の地震活動を対象としているが、ダム貯水がその付近の地震活動に影響を及ぼすと考えるとき、ダムの極く近傍での活動が皆無で、より離れた 20~30 km の地域にのみ影響を及ぼすことは考えにくい。上記二つの理由により、グループ B に属するダム地域の地震活動がダム貯水後“極めて有意”に活発化したという検定結果は棄却する。

§ 7. 極めて有意又は有意に地震活動が沈静化したダム地域

検定結果によると、貯水により極めて有意又は有意に沈静化したのは上記 12 ダム地域である。これらの地域に § 4 の作業 1, 2, 3 で作成した三種の地震活動の図で、ダム貯水による地震活動の推移を吟味した結果、

[C] ダム貯水により沈静化したと思われるダム：③ 草木、

[D] ダム貯水前に、調査地域及びその付近で発生した顕著な地震の後、その付近の地震活動の活性化がダム貯水頃まで継続し、その影響で統計処理の結果は貯水後の地震活動の沈静化を示したと思われるダム：⑨ 川俣、

[E] ダム地域の地震活動が間欠的で、ほぼ 5~15 年毎に活動期と沈静期とを繰返し、ダム貯水期が地震活動の沈静期と重なり、統計処理の結果、貯水により地震活動があたかも低下したように判定されたダム：⑩ 下小島、⑫ 新豊根、⑭ 池原、⑮ 小渋、⑯ 新冠、⑰ 黒川、⑱ 石手川、⑳ 松川、㉑ 大鳥、㉒ 横山、

にグループ分けすることができる。

グループ C に属するのは③ 草木ダムのみである。Fig. 7, 8 から分かるように、貯水開始 (1976 年 3 月) 前 5 年間に、30 km 以内に 6 回、貯水 2 箇月後 (1976 年 5 月)

Fig. 7. Same as Fig. 2, but around KUSAKI dam (No. 3).

Fig. 8. Same as Fig. 3, but around KUSAKI dam (No. 3).

に1回の地震が発生して以来、地震は発生していない。1926年以來の地震活動を見ても、このように長期間地震が発生しなかった時期はない (Fig. 9)。

このダムは、貯水開始が1976年と新しく貯水後の地震活動を議論するのは時間尚早の感もあるが、過去の地震活動から、貯水が地震活動に何らかの影響を与えたと考えられる。

グループDの⑨川俣ダム近傍の地震活動を Fig. 10 に示す。図から分かるように、貯水後の地震活動は1949年12月の今市地震 ($M:6.4$, 震央距離 38 km) の発生前と大差ない。しかるに、今市地震の発生から貯水にまでは、その前後の期間に比較して活発な地震活動を示す。このことは、今市地震によって付近に不安定な地殻応力の分布を引起し、付近の地震活動を活性化させた可能性を考えるのもひとつの見方であろう。この活動期の存在が統計処理の結果、貯水後の地震活動の相対的な低下をもたらしたと思われる。一方、ダム貯水がこの活性化した地震活動を沈静化させたとも考えられるが、現段階ではいずれも推測の域をでない。

グループEの例として⑩下小島 (Fig. 11) と⑫横山

Fig. 9. Same as Fig. 4, but around KUSAKI dam (No. 3).

Fig. 10. Same as Fig. 4, but around Kawamata dam (No. 9).

(Fig. 12) 近傍の地震活動を示す。これらの図でダムから30 km以内に注目すると地震の活動期と沈静期とが交互に現れるように見える。ダム貯水期は丁度この沈静期に当たっている。従って、統計処理の結果が貯水後地震活動の沈静化を示したものと思われる。

Fig. 11. Same as Fig. 4, but around Shimokojima dam (No. 10).

Fig. 12. Same as Fig. 4, but around Yokoyama dam (No. 42).

Fig. 13. Distribution map of the dams used for this research and the final result. Attached numbers correspond to dam number in Table 1. ●: Dam that the seismicity became active after the impoundment. ⊗: Dam that the seismicity became quiescent after the impoundment.

§ 8. 考察及び結論

1926～1960 年の新しい地震資料 [気象庁 (1982)] は、ダム近傍での地震活動に対する貯水の影響を定量的検定に耐え得るものとした。そこで、寺島 (1983) が定性的に調査した 43 ダム地域に対して、仮説検定法を用いて再検討した。

仮説検定は、貯水後の地震活動の指標として、貯水後 5 年間の年平均発生頻度を用い、1926 年から貯水前までの年発生頻度と比較して、その有意差の有無についてなされた。

その結果 20 ダム地域に有意差が認められたが、実際の地震活動と照合して、その有意差がダム貯水によると

Table 5. Discrepancy between the results of the present paper and OHTAKE (1986).

+: Activation of seismicity after the impoundment. -: Quiescence of seismicity after the impoundment. ±: Changelessness of seismicity throughout the pre- and post-impoundment.

	Terashima and Koya	Ohtake
1. KUROBE	+	+
3. KUSAKI	-	+
6. HITOTSUSE	+	+
9. KAWAMATA	±	+
11. TSURUTA	±	+

推定されるのは ① 黒部, ② 奈川渡, ③ 草木, ⑥ 一ツ瀬, ⑧ 九頭竜, ②⑥ 水殿の6ダム地域である。このうち、地震活動が沈静化したのは③草木ダム地域のみで、他の5ダム地域は活発化したと推定される (Fig. 13)。

仮説検定の結果、有意差の認められなかった23ダム地域は、実際の地震活動からもダム貯水によると思われるものはない。

寺島 (1983) は ② 奈川渡, ⑧ 九頭竜, ⑭ 池原, ⑮ 加治川, ⑳ 矢作, ㉑ 湯田, ㉒ 内ノ倉の各ダム地域で貯水後地震活動が活発化したという結果を得た。本研究と結果が一致するのは、② 奈川渡, ⑧ 九頭竜の2地域のみである。本研究と寺島 (1983) との際立った違いは貯水後地震活動が沈静化した③草木ダムが新たに識別されたことである。

上記の如き、本研究と寺島 (1983) との結果の差異は、

- (i) 本研究は1926～1960年に新しい地震資料を用い、地震資料の均質化を計ったこと、
- (ii) 調査地域として、本研究はダムより30 km以内、寺島 (1983) は50 km以内を用いたこと、
- (iii) 寺島 (1983) は地震活動のみの定性的な結果であるのに対して、本研究では客観的判断規準として仮説検定を導入したこと、
- (iv) 寺島 (1983) はダム完成年月日で地震活動を区分したのに対して、本研究では貯水年月日を用いたこと（ダムによって両者間に2～3年の違いがある）、

によると思われる。

本研究と OHTAKE (1986) とが調査対象としたダム地域で重複するのは①黒部から②③矢作の23ダム地域である。両者で結果が異なるのはTable 5の5ダム地域である。この相違は検定法の違いに起因することは勿論であるが、より大きな理由は、貯水後の地震活動の判定に用いた期間の長さ、すなわち本研究では貯水後5年間、

OHTAKE (1986) は無期限、によると思われる。ちなみに⑨川俣, ⑪鶴田の場合、調査期間を貯水後5年又は10年と限るならば、OHTAKE (1986) の結果も貯水後の変化は認められないであろう。このことは、本研究では未調査になっている牧尾ダムについても言えるであろう。

また、実際の地震活動を照合せずに、統計処理のみの判定では、ダム貯水直前より地震活動が活発化している場合、誤った結果を招く恐れがある。

ダム貯水はその付近の地震活動に何らかの影響を及ぼすとは考えられるが、その地域的広がり、期間については議論の余地がある。しかし、半永久的にダム貯水が付近の地震活動に影響を及ぼすとの考え方には疑問を残す。

謝 辞

本研究に対して、査読者諸氏よりいただいた有益なる御助言に心からの謝意を捧げる。

文 献

- 市川政治, 1982, 気象庁における地震定常調査業務の変遷 (主として電子計算機使用以降), 験震時報, 46, 39-46.
- 石本巳四雄・飯田波事, 1939, 微動計による地震観測 (1), 地震動の大きさ, 空間的分布, 地震研究所彙報, 17, 443-478.
- 気象庁, 1926-1960, 地震月報, 1926-1960.
- 気象庁, 1926-1980・10月, 地震月報, 1926-1980・10月.
- 気象庁, 1926-1982・2月, 地震月報, 1926-1982・2月.
- 気象庁, 1961-1975, 地震月報, 1961-1975.
- 気象庁, 1961-1982・2月, 地震月報, 1961-1982・2月.
- 気象庁, 1976-1982・2月, 地震月報, 1976-1982・2月.
- 気象庁, 1982, 改訂日本付近の主要地震の表 (1926年～1960年), 地震月報別冊第6号.
- LEE, T., 1972, A method for computing the deformation of the crust caused by the filling of large lakes, Bull. Seism. Soc. Amer., 62, 1597-1610.
- OHTAKE, M., Seismicity change associated with the impounding of major artificial reservoirs in Japan, Physics of the Earth and Planetary Interior, 44, 87-98.
- SIMPSON, D. W., 1976, Seismicity changes associated with reservoir loading, Engineering Geology, 10, 123-150.
- 寺島 敦, 1983, ダム貯水と地震活動 (1), 地震 2, 36, 373-382.
- 寺島 敦・松本利松, 1984, ダム貯水と地震活動 (2) — タベラダム (ドミニカ) の場合 —, 地震 2, 37, 81-88.
- 鷲尾泰俊, 1983, 推定と検定, 共立出版株式会社, 123

pp.

化学研究所彙報, 15, 1083-1089.

渡辺 慧, 1936, 地震の偶然性と続発性と周期性と, 理